

**Università degli Studi di Padova**

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



INGEGNERIA CIVILE,  
EDILE E AMBIENTALE  
CIVIL, ARCHITECTURAL AND  
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

## **ISOLAMENTO SISMICO DEL CONTENUTO: IL SISTEMA ROLLING-BALL RUBBER-LAYER**

*Studio e modellazione del dispositivo e indagine sugli  
effetti locali*

*Tesi di laurea magistrale*

**Relatore:**

Ch.mo Prof. Ing. Claudio Modena

**Candidato:**

Enrico Patechi

**Correlatori:**

Ing. Marco Donà

---

**Anno Accademico 2013/2014**



*Alla mia Famiglia (quattro zampe inclusi)  
che mi ha sempre supportato e sopportato,  
ai miei Amici  
che hanno rallegrato e riempito le mie giornate,  
e a Te.*



“Haec autem ita fieri debent, ut habeatur  
ratio firmitatis, utilitatis, venustatis.

*De Architectura, Vitruvio*

“Après le tremblement de terre qui avait  
détruit les trois quarts de Lisbonne, les sages  
du pays n’avaient pas trouvé un moyen plus  
efficace pour prévenir une ruine totale que de  
donner au peuple un bel auto-da-fé; il était  
décidé par l’université de Coïmbre que le  
spectacle de quelques personnes brûlées à  
petit feu, en grande cérémonie, est un secret  
infaillible pour empêcher la terre de trembler”

*Candide, Voltaire*



## INDICE

---

<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>1 Isolamento sismico</b>	<b>5</b>
1.1 Background ed evoluzione storica . . . . .	5
1.1.1 Background dei sistemi elastomerici . . . . .	9
1.1.2 Background dei dispositivi a scorrimento . . . . .	14
1.1.3 Background dei sistemi a rotolamento . . . . .	16
1.1.4 Il presente dell'isolamento sismico . . . . .	19
1.2 Sistemi di controllo per la protezione sismica delle strutture . . . . .	20
1.2.1 Il controllo attivo . . . . .	20
1.2.2 Il controllo passivo . . . . .	21
1.2.3 Il controllo ibrido (semiattivo) . . . . .	24
1.3 Basi teoriche dell'isolamento sismico . . . . .	25
1.3.1 Approccio energetico . . . . .	25
1.3.2 Approccio dinamico . . . . .	27
1.4 Cenni sulla dissipazione energetica e background storico . . . . .	30
1.5 Dispositivi di isolamento sismico . . . . .	32
1.5.1 Isolatori elastomerici . . . . .	33
1.5.2 Isolatori a scorrimento . . . . .	37
1.5.3 Isolatori a rotolamento . . . . .	40
1.6 Dispositivi di isolamento sismico per strutture leggere . . . . .	42

1.6.1	Oggetti d'arte . . . . .	44
1.6.2	Apparecchiature medicali . . . . .	46
1.6.3	Strumentazione elettrica . . . . .	47
1.6.4	Dispositivi a slitta . . . . .	50
1.6.5	Dispositivi a rotolamento . . . . .	55
1.6.6	Altri dispositivi . . . . .	60
<b>2</b>	<b>Comportamento dinamico delle gomme</b>	<b>67</b>
2.1	Viscoelasticità . . . . .	67
2.1.1	Proprietà dinamiche della gomma . . . . .	68
2.1.2	L'integrale di Boltzman . . . . .	72
2.1.3	La serie di Prony . . . . .	73
2.1.4	Modello di Kelvin-Voigt . . . . .	73
2.2	Metodi di linearizzazione . . . . .	74
<b>3</b>	<b>Rolling-Ball Rubber-Layer (RBRL)</b>	<b>77</b>
3.1	Storia e descrizione del dispositivo . . . . .	77
3.2	Componenti e materiali . . . . .	79
3.2.1	Sfere d'acciaio . . . . .	79
3.2.2	Cuscinetti di gomma . . . . .	80
3.2.3	Il sistema di ricentraggio . . . . .	80
3.3	Vantaggi del dispositivo RBRL . . . . .	80
3.4	Teoria alla base del dispositivo . . . . .	82
<b>4</b>	<b>Effetti locali di indentation</b>	<b>85</b>
4.1	Strumentazione utilizzata . . . . .	85
4.2	Tipologia di gomma utilizzata . . . . .	87
4.3	Raccolta dei dati . . . . .	90
4.4	Organizzazione dei dati raccolti . . . . .	93



4.5	Rappresentazione dei dati . . . . .	94
4.6	Pulizia dei dati sperimentali . . . . .	96
4.7	Grafici di inviluppo . . . . .	97
4.8	Elaborazione dei dati . . . . .	101
4.9	Confronti ed analisi . . . . .	102
4.9.1	Confronti all'interno della singola prova . . . . .	103
4.9.2	Considerazioni sul recupero della gomma . . . . .	111
4.9.3	Effetti dovuti al tempo di stazionamento, gomma AA . . . . .	113
4.9.4	Confronti tra gomme (tempo di stazionamento 24h) . . . . .	120
<b>5</b>	<b>Proposta di una procedura di progettazione</b>	<b>127</b>
<b>6</b>	<b>Modellazione del dispositivo</b>	<b>135</b>
6.1	Modello di Guerreiro . . . . .	135
6.2	Modello del dispositivo . . . . .	137
6.2.1	Elemento <i>Spring-Damper</i> , molla non lineare . . . . .	138
6.2.2	Elemento Point Contact Normal . . . . .	142
6.3	Caso studio: le Arche Scaligere, Temperanza . . . . .	149
6.3.1	Excursus storico . . . . .	149
6.3.2	Rilievo della statua e mesh utilizzata . . . . .	151
6.3.3	Locazione del sito e caratterizzazione sismica . . . . .	153
6.3.4	Metodologia di analisi . . . . .	155
6.3.5	Il fenomeno del <i>rocking</i> . . . . .	156
6.3.6	Risultati delle analisi . . . . .	158
<b>A</b>	<b>Abachi per la progettazione</b>	<b>167</b>
<b>B</b>	<b>Accelerogrammi</b>	<b>173</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>176</b>



## ELENCO DELLE FIGURE

---

1.1	Tempio di Paestum (a), schema dell'isolamento dato dallo strato sottostante (b) (Clemente, 2010) . . . . .	6
1.2	Brevetto originale di Bechtold, 1906 (Onorio, 2009a) (a), e brevetto originale di Calantari, 1909 (Onorio, 2009a) (b) . . . . .	7
1.3	Pilastro dell'ospedale Olive View (a), schema del "Soft first Story Method" (b), collasso dell'ospedale Olive View (c) . . . . .	8
1.4	Isolatore usato nella scuola di Pestalozzi (Kelly J.M.) (a), e vista della scuola di Pestalozzi (Kelly J.M.) (b) . . . . .	10
1.5	South Rangitikei Rail Bridge <sup>1</sup> (a), schema del sistema di isolamento impiegato (McKay, Chapman e Kirkcaldie, 1990) (b) . . . . .	11
1.6	Oakland City Hall (a), schema del <i>retrofitting</i> (b) . . . . .	12
1.7	San Francisco City Hall (a), e schema dell'intervento eseguito nel 2000 (b) . .	13
1.8	Brevetto di Westwood . . . . .	14
1.9	Brevetto originale di Penkuhn, 1967 (Tsai, 2012a) (a), FPS brevettato da Zayas nel 1985 (Zayas, Low e Mahin, 1990) (b), cross section del dispositivo FPS (Zayas, Low e Mahin, 1990) (c) . . . . .	15
1.10	Dispositivo MFPS (Tsai, 2012b) (a), dispositivo di Tsai a N superfici (Tsai, 2012b) (b) . . . . .	16
1.11	Brevetto originale di Touaillon, 1870 (Tsai, 2012a) (a), Brevetto originale di Schär, 1910 (Tsai, 2012a) (b) . . . . .	17

1.12 Dispositivo brevettato da Cummings nel 1930 (a), brevetto di Bakker del 1935 (b) . . . . .	18
1.13 Edifici isolati nel mondo . . . . .	19
1.14 Edifici isolati in Italia . . . . .	19
1.15 Schematizzazione di una struttura con isolamento sismico . . . . .	27
1.16 Prime due forme di vibrazione . . . . .	29
1.17 Cicli isteretici dissipatori (a) . . . . .	31
1.18 Cicli isteretici dissipatori (b) . . . . .	31
1.19 Isolatore elastomerico . . . . .	33
1.20 Cicli isteretici dissipatori elastomerici . . . . .	35
1.21 Isolatore elastomerico con nucleo in piombo . . . . .	36
1.22 Dispositivo CRB (a), sezione del dispositivo CRB (b) . . . . .	37
1.23 Isolatore a scorrimento . . . . .	38
1.24 Costi nelle strutture civili . . . . .	42
1.25 Rottura della statua di Saturnino Gatti (a) e ribaltamento di una statua deco- rativa (b) . . . . .	45
1.26 Danni a oggetti di valore quali ceramiche (a) e vasellame (b). Nias Heritage Museum, Indonesia (Neurohr, 2005) . . . . .	46
1.27 Danni subiti all'interno del Veteran Hospital (a), e danni all'ospedale di Shiu- Tuan (b) . . . . .	47
1.28 Cabina elettrica danneggiata (a) e danni ai cavi (b) . . . . .	48
1.29 Sistema MELIS presente sul tetto dell'edificio (a), e spostamento subito dal- l'oggetto dopo il sisma (b) . . . . .	49
1.30 Dispositivo a doppio pendolo (a), e apparato sperimentale utilizzato nei test (b)	50
1.31 Prigione Barbuto (a), e tensioni presenti nella statua con modello FEM (b) . .	51
1.32 Dispositivo Roller-Type (a) e relativo schema di funzionamento (b) . . . . .	52

1.33 Applicazione del dispositivo ai Borghesi di Calais di Auguste Rodin (a) e alle vetrine del Gifu Modern Museum (b) . . . . .	53
1.34 Viste del Linear Rail Device utilizzato al Getty Villa Museum (Lowry et al., 2007)	54
1.35 Applicazione del dispositivo <i>in situ</i> (a), e applicazione all'Agrigento Youth (b) .	54
1.36 Dispositivo SDI-BPS in assonometria (a) e relativo ciclo isteretico (b) . . . . .	56
1.38 Schema del dispositivo BNC (a), dispositivo in assonometria (b), e viste prospettiche della base isolata per vetrine con dispositivi BNC (c) . . . . .	58
1.39 Istanbul Archaeological Museums . . . . .	58
1.40 Dispositivo RPTMD (a), e relativo schema di funzionamento (b) . . . . .	60
1.41 Dispositivi Wire-Rope (a), e relativo schema di funzionamento (b) . . . . .	61
1.42 Modello sperimentale per lo studio dei dispositivi Wire-Rope (a) (Demetriades, Constantinou e Reinhorn, 1993), e applicazione dei dispositivi in una centrale elettrica (b) . . . . .	62
1.43 Bronzi di Riace (Wikipedia) (a), schema di funzionamento del dispositivo (b) .	63
1.44 Dispositivo di isolamento (a), vista della base superiore del dispositivo aperta (b)	63
1.45 Forze agenti nei cavi pre e post-intervento . . . . .	64
2.1 Sfasamento tra sforzo e deformazione . . . . .	69
2.2 Modello di Kelvin-Voigt . . . . .	74
3.1 Dispositivo RBRL, sezione trasversale . . . . .	78
3.2 Dispositivo RBRL . . . . .	79
3.3 Configurazione sperimentale dei test eseguiti . . . . .	81
3.4 Determinazione del parametro Q . . . . .	82
3.5 Andamento di $\mu$ . . . . .	84
4.1 Schema dell'apparato sperimentale utilizzato . . . . .	86
4.2 Apparato sperimentale utilizzato . . . . .	87
4.3 Apparato sperimentale utilizzato . . . . .	87

4.4 Parametri dinamici delle gomme . . . . .	88
4.5 Parametri dinamici delle gomme . . . . .	88
4.6 Configurazione delle gomme utilizzata . . . . .	90
4.7 Risultati dei test - 1 . . . . .	92
4.8 Risultati dei test - 2 . . . . .	93
4.9 Divisione dei dati sperimentali in cicli . . . . .	94
4.10 Scatter plot 5 mm . . . . .	95
4.11 Scatter plot 12.5 mm . . . . .	95
4.12 Scatter plot . . . . .	95
4.13 Risultati dell'elaborazione a v31 . . . . .	97
4.14 Inviluppo per v31 . . . . .	98
4.15 Inviluppo ciclo 2 . . . . .	98
4.16 Inviluppo ciclo 1 . . . . .	99
4.17 Inviluppo ciclo 3 . . . . .	99
4.18 Zona di influenza del <i>pit</i> . . . . .	100
4.19 $K'$ v31 <i>pit</i> . . . . .	103
4.20 $K'$ v31 . . . . .	104
4.21 $K''$ v31 . . . . .	104
4.22 $K^*$ v63 . . . . .	106
4.23 $\delta$ v63 . . . . .	106
4.24 $\delta$ v63 . . . . .	107
4.25 $K'$ per il ciclo 2 . . . . .	108
4.26 $K''$ per il ciclo 2 . . . . .	109
4.27 $K''$ per il ciclo 2 . . . . .	109
4.28 Regressione non lineare . . . . .	110
4.29 Analisi dei residui . . . . .	111
4.30 Recupero della gomma . . . . .	112

4.31 Confronti parametro $K'$ per diversi tempi di stazionamento . . . . .	114
4.32 Confronti parametro $K^*$ per 6 sfere . . . . .	115
4.33 Confronti parametro $K^*$ per 6 sfere . . . . .	115
4.34 Confronti parametro $\delta$ per 6 sfere . . . . .	116
4.35 Confronti parametro $\delta$ per 6 sfere . . . . .	116
4.36 Effetti del tempo di stazionamento sulla rigidezza . . . . .	118
4.37 Effetti del tempo di stazionamento su $K''$ . . . . .	118
4.38 Effetti del tempo di stazionamento su $K'$ . . . . .	119
4.39 Effetti del tempo di stazionamento su $K''$ . . . . .	119
4.40 Configurazione delle gomme utilizzata . . . . .	120
4.41 Confronti per il parametro $K'$ . . . . .	121
4.42 Confronti per il parametro $K''$ . . . . .	121
4.43 Confronti per il parametro $K'$ e $K''$ . . . . .	122
4.44 Confronti per il parametro $K'$ . . . . .	123
4.45 Confronti per il parametro $K''$ . . . . .	123
4.46 Confronti per i parametri $K'$ e $K''$ . . . . .	124
4.47 Andamento del parametro $\delta$ . . . . .	124
5.1 Spettro in spostamento da EC8 . . . . .	128
5.2 Abaco che lega $K$ , $D$ e diametro delle molle (Donà, 2015) . . . . .	129
5.3 Scelta del diametro delle molle . . . . .	133
5.4 Scelta del valore di $t/R$ . . . . .	133
6.1 Modello proposto da Guerreiro . . . . .	136
6.2 Modello alternativo . . . . .	136
6.3 Schema del modello semplice . . . . .	138
6.4 Elemento spring-damper . . . . .	139
6.5 Molla non lineare . . . . .	141
6.6 Elemento spring-damper . . . . .	142

6.7	Ciclo d'esempio	146
6.8	Accelerogramma El Centro	147
6.9	Confronto accelerazioni El Centro	148
6.10	Ciclo forza-spostamento El Centro	148
6.11	Le Arche Scaligere	149
6.13	La Temperanza	150
6.14	La Temperanza, modello 3D digitalizzato	151
6.15	Mesh della statua in Straus7	152
6.16	Elemento brick, Tetra4	153
6.17	Posizione del sito	154
6.18	Spettro allo SLV	154
6.19	Accelerazione di picco per la statua isolata	155
6.20	Grafico di Ishiyama	157
6.21	Criterio di Von Mises	158
6.22	Analisi statica lineare, carico gravitazionale	159
6.23	Base fissa vs base isolata	160
6.24	Ciclo forza spostamento	161
6.25	Stress nella statua, sisma in X	162
6.26	Stress nella statua, sisma in Y	163
A.1	Spettro in accelerazione EC8	168
A.2	Spettro in spostamento EC8	168
B.1	Spettro allo SLV	173
B.2	Accelerogramma 1	174
B.3	Accelerogramma 2	174
B.4	Accelerogramma 3	174
B.5	Accelerogramma 4	175
B.6	Accelerogramma 5	175



B.7 Accelerogramma 6 . . . . .	175
B.8 Accelerogramma 7 . . . . .	176



## ELENCO DELLE TABELLE

---

1.1	Classificazione sistemi passivi di dissipazione . . . . .	23
3.1	Studi eseguiti sul dispositivo RBRL . . . . .	78
4.1	Caratteristiche meccaniche delle gomme A e B . . . . .	88
4.2	Schema delle prove eseguite . . . . .	90
4.3	Primo input sinusoidale . . . . .	91
4.4	Input sinusoidali successivi . . . . .	91
4.5	Elaborazioni - 1 . . . . .	101
4.6	Elaborazioni - 2 . . . . .	102
4.7	Confronto tempi di stazionamento . . . . .	117
5.1	Ciclo considerato per la progettazione . . . . .	129
5.2	Parametri in input e output per progettare il dispositivo . . . . .	130
5.3	Abaco che lega $\mu$ a $t/R$ . . . . .	131
5.4	Abaco per determinare $K$ e $\mu$ in funzione degli altri parametri . . . . .	132
6.1	Elementi point contact . . . . .	143
6.2	Dati oggetto e isolatore . . . . .	147
6.3	Coordinate naturali . . . . .	153
6.4	Caratteristiche del sistema di isolamento . . . . .	155
6.5	Calcolo dell'accelerazione di <i>rocking</i> . . . . .	157

6.6	Tensioni massime, analisi statica lineare . . . . .	160
6.7	Riduzione delle accelerazioni di picco in termini percentuali . . . . .	161
6.8	Confronto tra le tensioni sullo stesso elemento tra le varie analisi, Verona 1, direzione X . . . . .	163
6.9	Confronto tra le tensioni sullo stesso elemento tra le varie analisi, Verona 1, direzione Y . . . . .	164
6.10	Riduzione delle tensioni per sisma in X e in Y . . . . .	164
A.1	Abaco 1 . . . . .	169
A.2	Abaco 2 . . . . .	170
A.3	Abaco 3 . . . . .	171
A.4	Abaco 4 . . . . .	172



## INTRODUZIONE

---

La classica filosofia della progettazione strutturale alle azioni sismiche, basata sulle forze (*Force-Based Design*) o sugli spostamenti (*Displacement-Based Design*) prevede di costruire strutture sismo-resistenti, basandosi sui concetti di *capacity design*. Tale progettazione, quindi, è indirizzata alla realizzazione di strutture in grado di resistere agli eventi sismici attraverso lo sfruttamento della loro duttilità, locale e globale.

Tale filosofia progettuale, se la progettazione è correttamente eseguita e in caso di eventi sismici paragonabili a quelli di progetto, garantisce un adeguato grado di sicurezza per il collasso della struttura ma comporta di fatto un globale danneggiamento irreversibile della stessa, con le relative conseguenze negative di tipo economico e sociale, nel caso ad esempio di edifici sensibili che debbano interrompere le loro attività in seguito al sisma (ospedali, aziende).

La filosofia di pensiero alternativa, invece, prevede la massima riduzione del danneggiamento strutturale portando di fatto la struttura a rispondere ad un evento sismico in modo elastico, in quanto punta a disaccoppiare il moto della struttura dal moto del terreno sottostante, interponendo elementi strutturali dotati di bassa rigidezza alle azioni orizzontali. Creando tale disconnessione tra le fondazioni ancorate o appoggiate al terreno e la sovrastruttura, si va a ridurre l'accelerazione, e quindi l'energia, entrante all'interno della sovrastruttura stessa.

L'introduzione degli isolatori sismici determina infatti un incremento del periodo proprio di vibrazione della struttura, portandolo al di fuori del range critico entro cui si hanno effetti di risonanza/amplificazione delle eccitazioni sismiche, i quali comportano le massime accelerazioni per la struttura in questione e la località considerata. Inoltre si conferisce alla

struttura una forma del primo modo di vibrare che localizza la quasi totalità delle deformazioni a livello degli isolatori, garantendo alla sovrastruttura un comportamento di moto rigido, cioè caratterizzato dalla quasi totale assenza di deformazione o danneggiamento.

Da qualche anno a questa parte si è sviluppata una nuova sensibilità nel campo dell'ingegneria sismica, ovvero verso la protezione di strutture leggere che possono essere di inestimabile valore, quali il patrimonio artistico-culturale, oppure oggetti sensibili quali attrezzature mediche da ospedali o apparecchi elettrici sensibili alle vibrazioni. Il principale problema risiede nella necessità di trovare accorgimenti e tecniche specifici, in relazione al bene da proteggere e alla sismicità del sito in questione. Inoltre bisogna trovare delle modalità di protezione per questi oggetti che siano generalizzabili, ossia non ideate *ad hoc* per un singolo bene, in modo da contenere i costi di produzione e velocizzarne ed estenderne la messa in opera.

---

# CAPITOLO 1

## ISOLAMENTO SISMICO

---

### 1.1 Background ed evoluzione storica delle tecniche di protezione sismica delle strutture

In questo paragrafo viene presa in esame la storia dell'isolamento sismico, dagli albori alle sue più recenti innovazioni. Si cerca di dare spazio alle idee più innovative che hanno permesso di sviluppare tutti quei dispositivi che vengono prodotti ed impiegati ad oggi.

Si può far risalire a 2500 anni fa la prima idea di isolamento sismico. Molti templi greci infatti furono edificati sopra a strati di terreno soffice per la protezione dall'azione sismica (Figura 1.1b), alcuni celebri esempi sono (Bongiovanni et al., 2011) (De Stefani, 2012):

- ◇ il tempio di Artemide ad Efeso (eretto nel VI secolo a.C. e riedificato nel 416 a.C. dopo un incendio), costruito su strati alterni di carbone e velli di lana, come testimoniato da Plinio il Vecchio nella *Naturalis Historia*:

“Graecae magnificentiae vera admiratio exstat templum Ephesiae Dianae CXX annis factum a tota Asia. In solo id palustri fecere, ne terrae motus sentiret aut hiatus timeret, rursus ne in lubrico atque instabili fundamenta tantae molis locarentur, calcatis ea substravere carbonicus, dein velleribus lanae.” (*N.H.*, 36,95)

- ◇ le Grandi Mura di Troia (metà del II millennio a.C.). Durante gli scavi condotti negli anni '30, l'archeologo statunitense Carl Blegen constatò che sotto le fondazioni del



grande muro fu deliberatamente lasciato uno strato di terra compatta (*hard-packed*) tra il piano di fondazione e la roccia di base. Blegen ipotizzò che gli antichi costruttori avevano voluto salvaguardare il muro dal pericolo dei terremoti lasciando un cuscino di terra ( “*a cushion of earth*”) che agisse come un semplice *shock absorber* tra roccia e fondazioni.

- ◇ il tempio Heraion di Olimpia (VI secolo a.C.) anche questo costruito su strati alterni di carbone e velli di lana;
- ◇ il tempio di Atena ad Ilion (III secolo a.C.) costruito su strati di sabbia e pietrisco, così come il tempio di Paestum in Figura 1.1a (Martelli, 2010).

Anche in Perù la tecnica dell’isolamento sismico mediante l’interposizione di strati di terreno soffice in fondazione era ben conosciuta, infatti ne sono un esempio:

- ◇ le mura maestose della città di Cuzco (XIII secolo) le cui fondazioni sono realizzate su uno strato di spessore un metro costituito da sabbia e sassi;
- ◇ il monastero di Santa Catalina ad Arequipa (XVI secolo) che presenta fondazioni realizzate su una base isolante di sabbia e sassi.

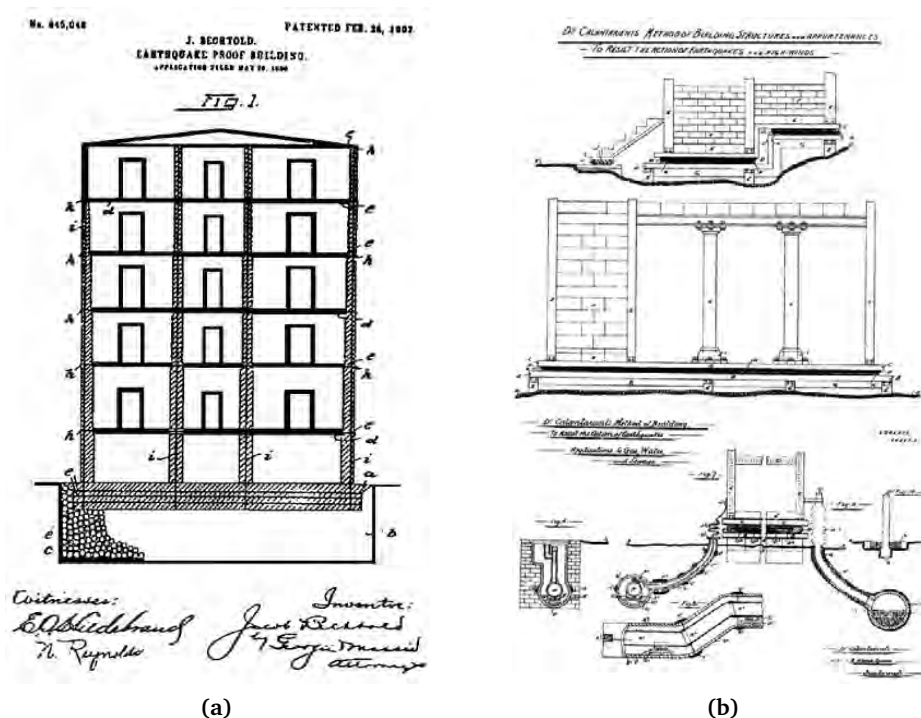


**Figura 1.1.** Tempio di Paestum (a), schema dell’isolamento dato dallo strato sottostante (b) (Clemente, 2010)

Originale fu K. Kawai nel 1891, con un’idea simile a quelle usate nell’antichità, propose infatti di porre strati alternati di calcestruzzo e tronchi di legno sotto la struttura.

Nel 1906 Jacob Bechtold propose di utilizzare una piastra indeformabile (capace di sostenere l'edificio e portare i carichi verticali), poggiante su un cuscino di corpi sferici di materiale rigido che facesse da isolante (figura 1.2a).

"...An earthquake proof building consisting of a rigid base-plate to carry the building and a mass of spherical bodies of hard material to carry the said base-plate freely."  
(Bechtold, 1907)

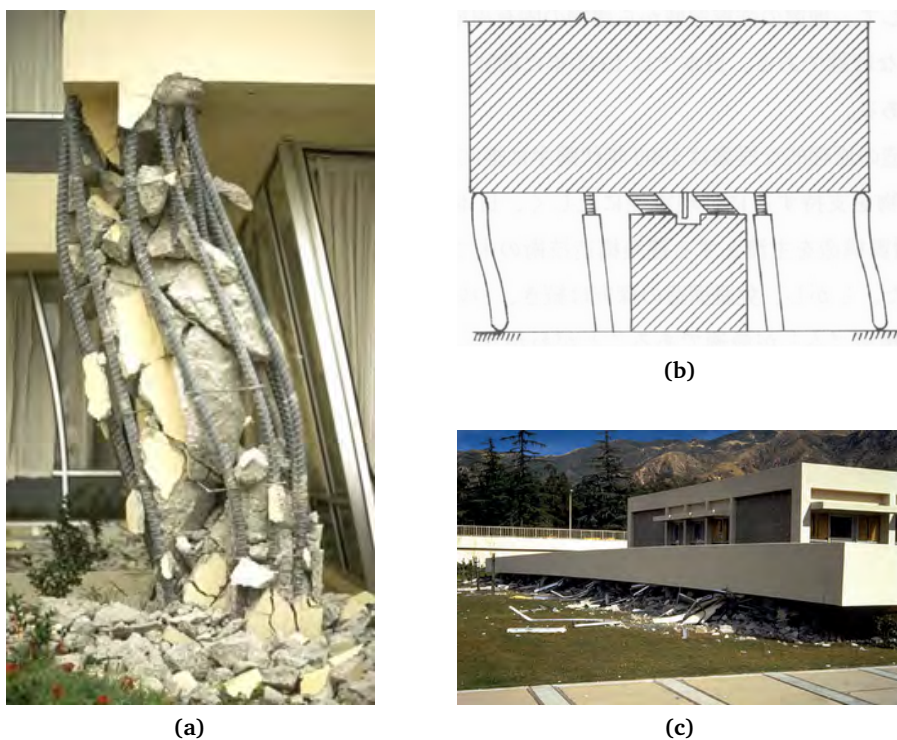


**Figura 1.2.** Brevetto originale di Bechtold, 1906 (Onorio, 2009a) (a), e brevetto originale di Calantariantes, 1909 (Onorio, 2009a) (b)

Nel 1909 il medico inglese Jhoannes Avetican Calantariantes prevede l'interposizione di uno strato di talco fra la struttura e le sue fondazioni capace di disaccoppiare il moto della struttura da quello del suolo, come illustrato in figura 1.2b. Con tale tecnica ottenne una cospicua riduzione delle accelerazioni pur se con rilevanti spostamenti.

Nel 1929, R. R. Martel propose il cosiddetto "*Flexible first story concept*", che consisteva nell'introdurre una serie di colonne flessibili al primo piano che servivano ad allungare il periodo naturale della struttura. Il sistema ricorda il meccanismo di piano soffice, ma invece

di essere concepito come un meccanismo di rottura fragile da evitare, in questo caso era un comportamento voluto e controllato.



**Figura 1.3.** Pilastro dell'ospedale Olive View (a), schema del "Soft first Story Method" (b), collasso dell'ospedale Olive View (c)

Sempre nel 1929, Robert Wladislas de Montalk di Wellington, Nuova Zelanda, depositò un brevetto per un'invenzione con allegato il seguente testo (Buckle e Mayes, 1990):

"...a means whereby a bed...is placed and retained between the base of a building and its solid foundation, the bed being composed of material which will absorb or minimize the shocks thereby saving the building therefrom."(de Montalk, 1932)

Green (1935) e Jacobsen (1938) idearono attraverso i loro studi il cosiddetto "The Soft first Story Method" che introduceva il concetto di assorbimento dell'energia mediante plasticizzazioni (Figura 1.3b). L'ospedale Olive View di Los Angeles fu costruito applicando questo metodo, ma non ebbe successo a causa dei vasti danni subiti a seguito del terremoto San Fernando del 1971. Il sistema si mostrò fortemente deficitario, subendo il meccanismo di

piano soffice come un danno e una mancanza strutturale, invece di fungere da punto di forza della struttura (Figure 1.3a e 1.3c).

In Italia, intanto, il famoso terremoto del 1908 distrusse Messina e Reggio Calabria, con ingente tributo in vite umane e spinse il governo italiano a ricercare una soluzione per preservare i tipici edifici in muratura del meridione da futuri eventi. Fu anche presa in considerazione l'ipotesi di dotare le costruzioni di dispositivi d'isolamento sismico, ricalcando i metodi utilizzati in tempi antichi, ovvero strati di sabbia e pietrisco tra suolo e struttura o anche sistemi di rulli interposti fra fondazione e sovrastruttura che ne permettessero lo scorrimento, ma non fu seguita, preferendo la via della rigidità e della resistenza, ossia quella di progettare edifici incastrati alla base, imponendo severe limitazioni in altezza e tenendo conto degli effetti del sisma attraverso una certa azione orizzontale.

### 1.1.1 Background dei sistemi elastomerici

La prima applicazione moderna dell'isolamento sismico è quella della scuola Pestolazzi di Skopje in Macedonia, ad opera di un gruppo di ingegneri svizzeri, ricostruita a seguito di un sisma nel 1960.

Il sistema di isolamento utilizzato, chiamato *Swiss Full Base Isolation 3D* (FBI-3D), rappresenta il prototipo degli attuali dispositivi elastomerici. Esso consisteva in 5 semplici appoggi in gomma non armata, ottenuti da fogli di gomma larghi 70 cm e spessi 7cm. Il fatto che la gomma non fosse armata si ripercuoteva sulla rigidità verticale, paragonabile a quella orizzontale.

L'elevata deformabilità della struttura in direzione verticale provocava fenomeni di *rocking* accoppiato al moto in direzione orizzontale. L'adozione di questo sistema non risultò soddisfacente e si fu anche costretti ad inserire vincoli aggiuntivi ottenuti da blocchi di vetro per fronteggiare sollecitazioni di natura non sismica, come il vento.

Negli anni '70 la *Malaysian Rubber Producers' Research Association* (MRPRA) produsse in Inghilterra i primi dispositivi elastomerici in gomma armata, sfruttando la vulcanizzazione



**Figura 1.4.** Isolatore usato nella scuola di Pestalozzi (Kelly J.M.) (a), e vista della scuola di Pestalozzi (Kelly J.M.) (b)

di strati di gomma con lamierini di acciaio. In realtà era già da tempo che alcuni studiosi si stavano interessando di isolatori in gomma ed acciaio, come A. N. Gent e P. B. Lindley, i quali si occuparono del problema tra il 1958 e il 1981. Il loro interesse era rivolto alle principali caratteristiche meccaniche (prove di trazione, compressione pura, taglio) della gomma e dei lamierini in acciaio.

La prima applicazione risale agli anni '70, su suolo francese. L'intervento si propone di proteggere una serie di centrali nucleari da terremoti di intensità pari a 0.2g avendo come vincolo architettonico/strutturale l'evitare di apportare modifiche alle strutture esistenti.

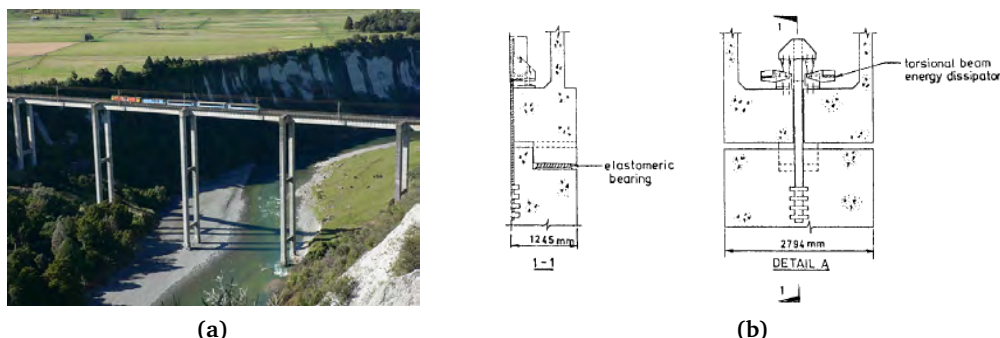
Furono impiegati isolatori in gomma (neoprene) armata e, successivamente, per aree a maggiore intensità sismica, una combinazione di isolatori in gomma armata e dispositivi a scorrimento, aventi un coefficiente di attrito pari al 20%.

Il dispositivo di isolamento, fu ottenuto grazie ad una combinazione tra un sistema elastomerico e un dispositivo a scorrimento; vi era il cuore in neoprene con lamine d'acciaio collegato a piatti di bronzo, a loro volta collegati a piatti d'acciaio inossidabile. Il neoprene aveva una capacità di spostamento limitata e, quando si superava tale limite, i piatti d'acciaio cominciavano a scorrere su quelli in bronzo, garantendo l'isolamento anche per grandi scorrimenti. Il problema di questo apparecchio era la totale assenza di un sistema di ricentraggio, l'unico debole contributo era dato infatti dal nucleo in neoprene.

Sempre negli anni '70 vi è un'altra applicazione di isolamento sismico moderno, per un

---

<sup>1</sup>Tratta da [www.flickr.com](http://www.flickr.com)



**Figura 1.5.** South Rangitikei Rail Bridge<sup>1</sup> (a), schema del sistema di isolamento impiegato (McKay, Chapman e Kirkcaldie, 1990) (b)

ponete sul fiume Rangitikei, in Nuova Zelanda. Il sistema si basava sull'accoppiamento di elementi flessibili ed elementi dissipativi, realizzati con barre d'acciaio sottoposte a torsione (McKay, Chapman e Kirkcaldie, 1990). Tra il 1970 e il 1980 si assiste a una grande diffusione delle tecniche di isolamento per viadotti e ponti, soprattutto in Giappone. Dalla metà degli anni '70 l'Italia entra nelle scene dell'isolamento sismico internazionale, acquisendo in breve la *leadership* mondiale nel settore.

Dal 1980 vi fu una vasta diffusione di applicazioni in tutto il mondo, soprattutto in Nuova Zelanda e negli USA. Vennero soprattutto impiegati isolatori elastomerici ad elevato smorzamento, basati sull'impiego di gomma ad alta dissipazione (HDRB) o con inserti in piombo (LRB). In Giappone ebbero ampia diffusione i dispositivi elastomerici a basso smorzamento (LDRB) accoppiati a dissipatori viscosi o isteretici.

Negli anni 1994-1995, infatti, si ebbero due eventi sismici catastrofici: Northridge in California nel '94 e Kobe in Giappone nel '95. Nonostante la notevole intensità dei due eventi, però, le aree colpite presentavano alcune strutture sismicamente isolate che subirono pochissimi danni o addirittura rimasero agibili durante il sisma. Eclatante fu l'esempio dell'University Teaching Hospital che restò attivo e ospitò i degenti dell'ospedale Olive View, il quale, basato sul sistema del *piano soffice*, subì notevoli danni alle finiture e alle attrezzature interne.

Negli anni '90 nacque anche la filosofia dell'*adeguamento sismico* con il notevole vantaggio,

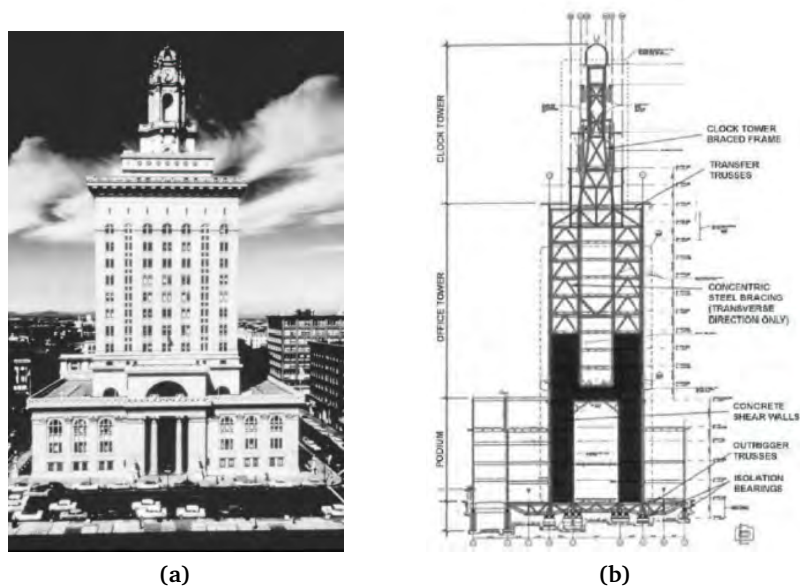


Figura 1.6. Oakland City Hall (a), schema del retrofitting (b)

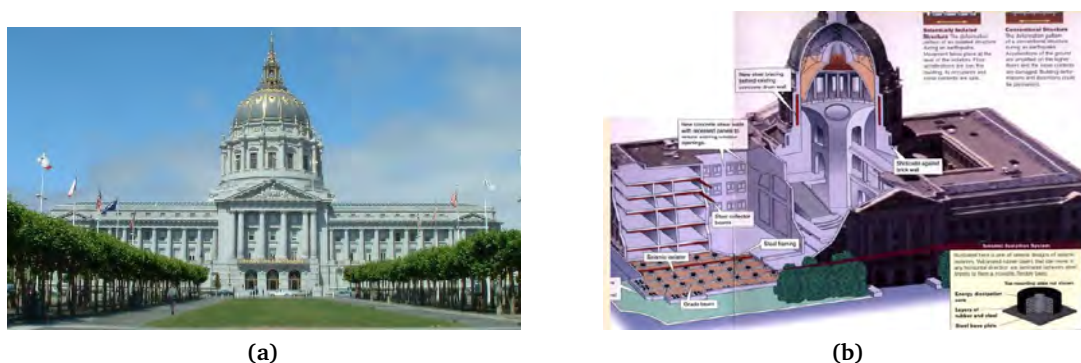
rispetto alle tecniche tradizionali, di non dover intervenire sullo scheletro della struttura esistente.

Uno dei primi interventi fu la City Hall di Oakland (Figura 1.6a) negli Stati Uniti. L'edificio era particolarmente importante per vari motivi, prima di tutto perché fu il primo edificio alto governativo degli Stati Uniti, in secondo luogo perché nel 1914, ai tempi della sua costruzione, era il più alto edificio della costa occidentale raggiungendo 324 piedi di altezza. La struttura già subì notevoli danni con il terremoto di Loma Prieta del 1989 e gli interventi prevedevano l'impiego di 111 isolatori in gomma armata, di cui 36 con inserti in piombo (Walters, 2003). L'inserimento dei dispositivi avvenne con taglio delle colonne al primo piano e temporaneo impiego di martinetti idraulici (Figura 1.6b).

Un altro esempio importante fu l'intervento di adeguamento della San Francisco City Hall nel 2000, la quale era stata costruita secondo la filosofia del *piano soffice*, dunque fu previsto un intervento di inserimento di dispositivi di isolamento elastomerici tagliando le colonne alla base (530 dispositivi LRB). Vennero anche inseriti degli *shear walls* accoppiati al sistema di isolamento. Il costo totale dell'intervento di *retrofitting* fu di 105'000'000 US\$.

Si ricorda infine la prima applicazione italiana del 1981: la stazione dei vigili del fuoco di





**Figura 1.7.** San Francisco City Hall (a), e schema dell'intervento eseguito nel 2000 (b)

Napoli.

Comunque, fino ad ora, è sempre stata data poca importanza al problema dell'isolamento di strutture leggere o di strumenti molto sensibili alle vibrazioni (quali apparecchiature mediche, *hardware* informatico, oggetti d'arte), che in alcuni casi devono essere mantenuti funzionanti anche durante l'evento sismico in quanto necessari per salvare vite umane. Quando non è possibile (costi eccessivi) o non conveniente isolare un edificio può essere interessante l'idea di isolarne il contenuto, per motivazioni di tipo economico (apparecchiature industriali ecc.) o sociale (perdita della vita per la caduta di apparecchiature, perdita di lavoro per le aziende, inoperatività di locali sensibili come le sale chirurgiche) ma anche culturale (opere d'arte).

I dispositivi utilizzati per isolare edifici o ponti (oggetti di massa considerevole) non sono adeguati per proteggere le strutture leggere. I sistemi di isolamento che cominciarono a prendere piede per la protezione delle strutture leggere sono quelli che separano la funzione di supporto da quella di riduzione della rigidità nel piano orizzontale e si possono dividere in tre grandi campi:

1. Sistemi a slitta;
2. Sistemi a rotolamento;
3. Altri dispositivi.

Un grande vantaggio dei sistemi a rotolamento è quello di separare la funzione di supporto del carico verticale dalla rigidità orizzontale offerta alla struttura.



I dispositivi a slitta invece hanno lo svantaggio di avere un attrito statico da vincere per innescare il moto, il quale poi si riduce notevolmente durante il movimento. Inoltre per isolare dispositivi leggeri servirebbero poi, per il ricentraggio del dispositivo, dei raggi di curvatura delle superfici concave che richiederebbero superfici di appoggio troppo estese. Al contrario, utilizzando raggi di curvatura minori per ridurre le dimensioni del dispositivo, si potrebbe incorrere in fenomeni di *rocking* che porterebbero al ribaltamento dell'oggetto poggiante sull'isolatore.

Un vantaggio di questi dispositivi che sfruttano l'attrito consiste nella possibilità che essi hanno di regolare “spontaneamente” la loro rigidità orizzontale, in base al carico verticale gravante su di essi (per la legge di Coulomb). Dunque essi risultano particolarmente vantaggiosi per sovrastrutture che presentano una marcata asimmetria di masse e, durante l'evento sismico, tendono a portare alla coincidenza di C.M. e C.R. evitando così l'insorgere di gravi effetti torsionali.

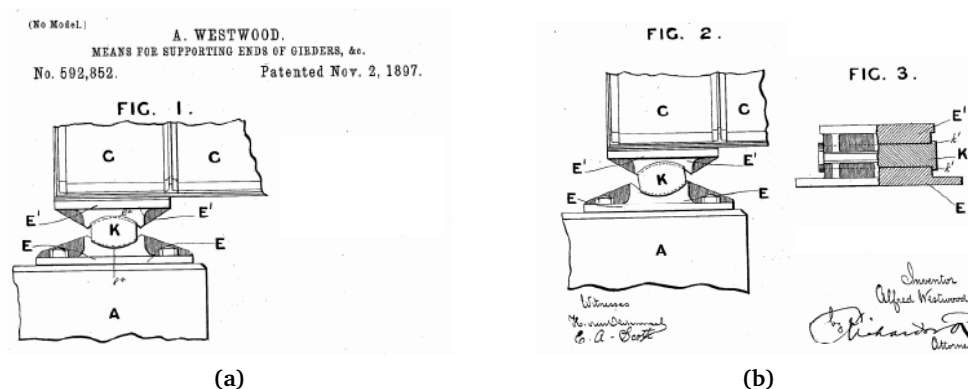


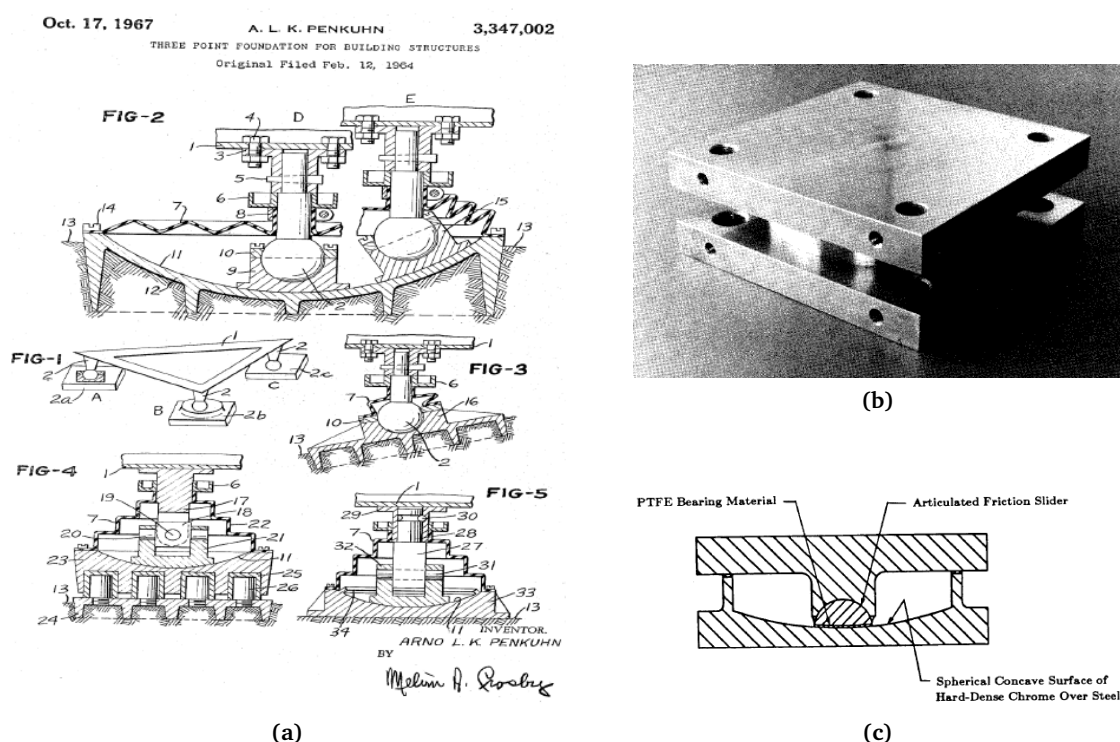
Figura 1.8. Brevetto di Westwood

### 1.1.2 Background dei dispositivi a scorrimento

La maggior parte dei sistemi a slitta può essere utilizzato sia per strutture leggere, sia per strutture pesanti come edifici o ponti. Questi meccanismi forniscono un grado di smorzamento attraverso l'attrito tra due superfici che scorrono a contatto.

Uno dei primi esempi che concettualmente si avvicinava al moderno *Friction Pendulum* fu inventato da A. Westwood nel 1897. Egli propose un sistema di scorrimento dotato di un blocco-slitta che poteva scorrere su delle superfici curve senza alcun meccanismo di articolazione (Figure 1.8a e 1.8b).

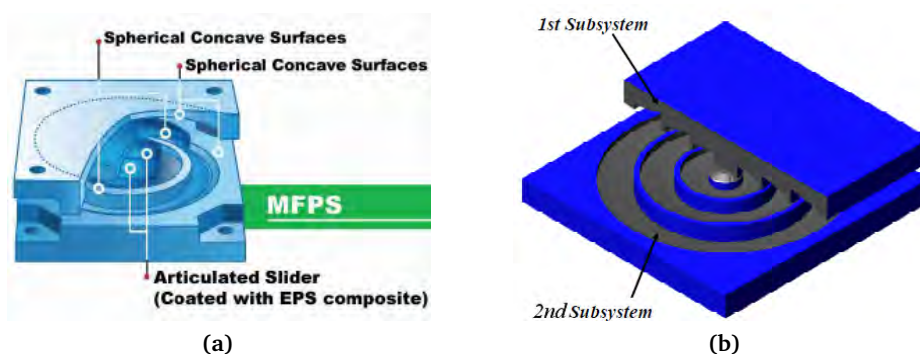
Penkuhn nel 1967 propose il primo prototipo di *friction pendulum* (Figura 1.9a), che venne poi ufficialmente inventato da Victor Zayas nel 1985 (FPS - *Friction Pendulum System*, Figura 1.9b e 1.9c).



**Figura 1.9.** Brevetto originale di Penkuhn, 1967 (Tsai, 2012a) (a), FPS brevettato da Zayas nel 1985 (Zayas, Low e Mahin, 1990) (b), cross section del dispositivo FPS (Zayas, Low e Mahin, 1990) (c)

Attraverso numerosi studi sperimentali, l'isolatore FPS si è rivelato un efficiente dispositivo per ridurre la risposta sismica delle strutture (Zayas, Low e Mahin, 1990).

Per evitare la possibilità di risonanza dell'isolatore per sismi con periodi lunghi predominanti, Tsai presentò uno studio analitico per dispositivi a curvatura variabile (VCFPS - *Variable Curvature Friction Pendulum System*).



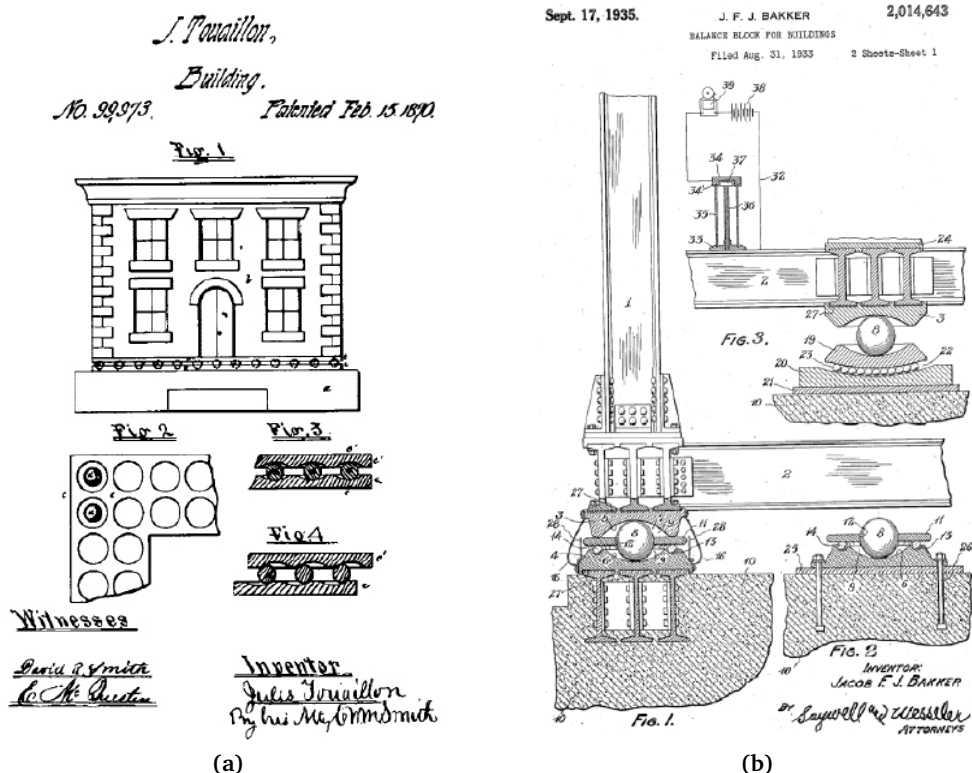
**Figura 1.10.** Dispositivo MFPS (Tsai, 2012b) (a), dispositivo di Tsai a  $N$  superfici (Tsai, 2012b) (b)

Successivamente fu brevettato da Tsai nel 2003 un *Multiple Friction Pendulum* (MFPS) con doppia superficie concava che raddoppiava la capacità di spostamento offrendo una riduzione della temperatura del meccanismo pari al 50% , e allo stesso tempo permetteva di ridurre le dimensioni totali del dispositivo. La frequenza fondamentale è più bassa rispetto al FPS e ciò è dovuto alla presenza di disconnessioni tra le due superfici del MFPS, inoltre lo smorzamento può essere calibrato modificando i coefficienti di attrito e i raggi di curvatura delle superfici.

Nel 2009 Tsai aumentò ulteriormente il numero di superfici curve fino ad arrivare ad un dispositivo che può avere  $N$  superfici scorrevoli.

### 1.1.3 Background dei sistemi a rotolamento

Nel 1870 Touaillon propose un sistema di isolamento formato da due superfici concave e una sfera interposta che potesse rotolare tra le due, come si può osservare dall'immagine 1.11a.



**Figura 1.11.** Brevetto originale di Touaillon, 1870 (Tsai, 2012a) (a), Brevetto originale di Schär, 1910 (Tsai, 2012a) (b)

Nel 1885 l'inglese John Milne progettò e realizzò una costruzione in legno fondata su pali dotata di un particolare dispositivo di isolamento sismico posto sulla punta dei pali costituito da sfere che permettevano lo scorrimento della struttura.

Schär nel 1910 invece propose vari sistemi di isolamento dotati di una sfera in grado di rotolare tra due superfici concave con la forma di una calotta sferica, si veda Fig. 1.11b.

Il sistema di isolamento che prevedeva due superfici concave e una sfera interposta rivelò alcuni difetti anche sotto piccoli carichi gravanti su di esso, per esempio un bassissimo smorzamento, sforzi molto concentrati dovuti alla piccola area di contatto, e graffi e danni prodotti sulle superfici concave causati dal rotolamento. Le sfere metalliche avevano infatti la tendenza a muoversi anche per azioni non eccezionali, come quelle dovute alle normali attività umane, inoltre la superficie di rotolamento era molto grande in quanto gli spostamenti sotto azione sismica risultavano essere ingenti, a causa dello smorzamento praticamente nullo

conferito dall'isolatore.

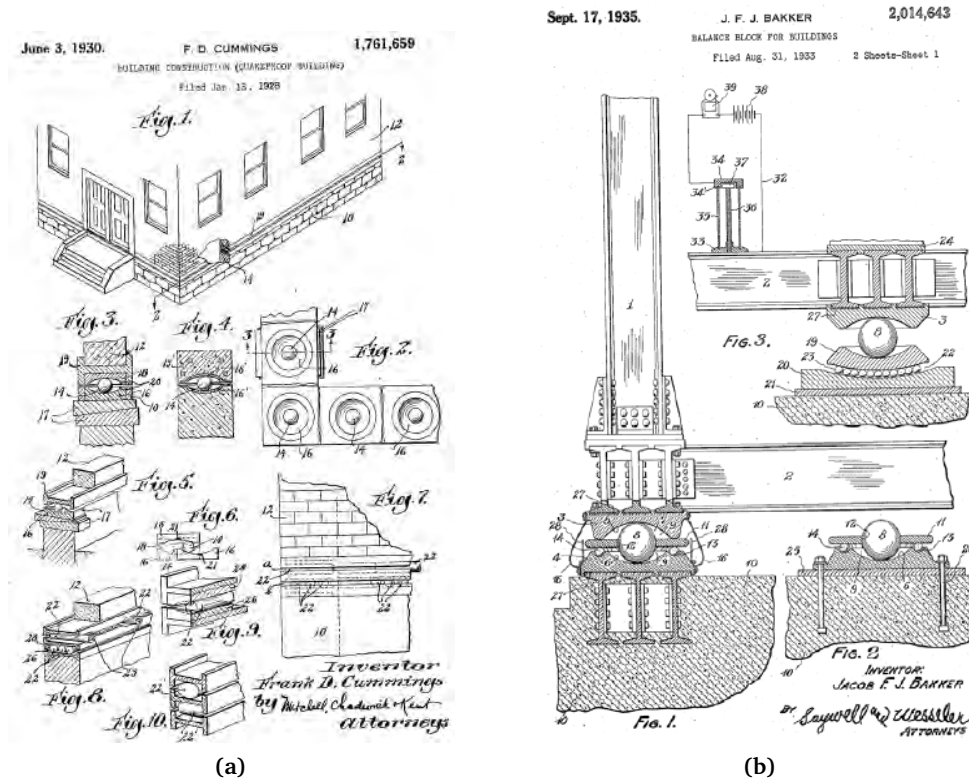


Figura 1.12. Dispositivo brevettato da Cummings nel 1930 (a), brevetto di Bakker del 1935 (b)

Nel 1930, Cummings propose un sistema di isolamento sismico dove dei cilindri potevano rotolare tra due superfici concave, come illustrato in Figura 1.12a.

Nel 1935, Bakker brevettò un altro sistema di isolamento dove una sfera poteva rotolare tra due superfici concave, molto simile a quello di Schär (Figura 1.12b).

Per provvedere un maggiore smorzamento e simultaneamente ridurre le dimensioni dell'area di rotolamento, Tsai et al. (2006) proposero un sistema a pendolo (BPS: *Ball Pendulum System*) che comprendeva due superfici concave ed una sfera rotolante rivestita di un materiale che garantiva un certo smorzamento durante il moto. Tuttavia il materiale isolante aveva problemi di plasticizzazione e di inefficienza dopo lunghi periodi.

### 1.1.4 Il presente dell'isolamento sismico

Ad oggi, l'isolamento sismico sta conoscendo una grandissima diffusione a livello globale, leader del settore il Giappone, come si può vedere in Fig. 1.13.

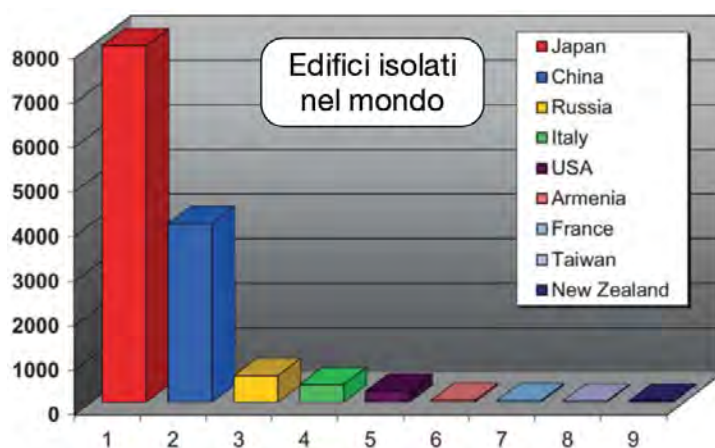


Figura 1.13. Edifici isolati nel mondo

L'Italia, attualmente al quarto posto, presenta un notevole incremento delle opere civili isolate sismicamente, con una visibile impennata negli ultimi 20 anni (Figura 1.14).

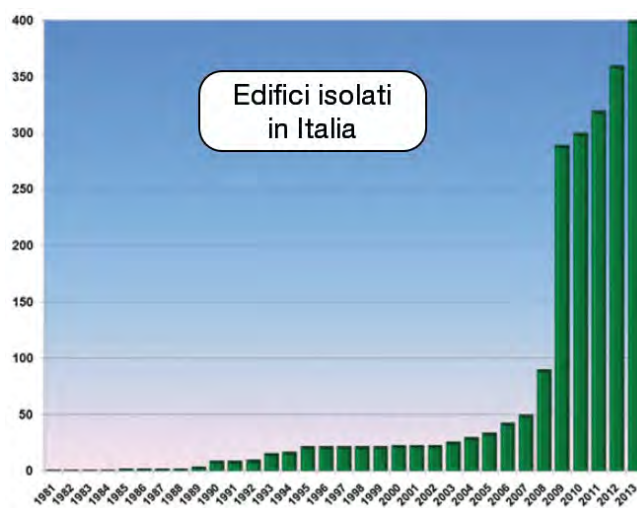


Figura 1.14. Edifici isolati in Italia

Ai paragrafi successivi saranno presentati i più moderni e utilizzati dispositivi di isolamento per strutture civili.

## 1.2 Sistemi di controllo per la protezione sismica delle strutture

Si presentano di seguito le principali tipologie di interventi per la protezione sismica degli edifici (Liberatore, 2000). Le tecniche di controllo strutturale sono state riconosciute come uno strumento molto efficace per ridurre l'azione del terremoto sulle strutture. Il loro effetto può essere compreso scrivendo la seguente equazione (Tsai, 2012a):

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -MB\ddot{u}_g + F(\ddot{u}, \dot{u}, u, t) \quad (1.1)$$

dove  $M$ ,  $C$ , e  $K$  sono le matrici di massa, di smorzamento, e di rigidezza della struttura. Invece  $u$ ,  $\dot{u}$  e  $\ddot{u}$  rappresentano i vettori di spostamento, velocità e accelerazione relativa rispetto al supporto,  $\ddot{u}_g$  è l'accelerazione del suolo.  $B$  è la matrice di trasformazione degli spostamenti e  $F(\ddot{u}, \dot{u}, u, t)$  la forza esterna di controllo data dai vari sistemi di controllo attivo o ibrido che possono essere impiegati.

L'isolamento sismico di base è impiegato per minimizzare le forze sismiche in due modi:

1. “riflettendo” l'energia sismica, o riducendone la quantità entrante, attraverso un allungamento del periodo naturale dell'intero sistema, includendo la struttura e l'isolatore di base;
2. “assorbendo” l'energia sismica, o dissipandola, attraverso cicli isteretici dovuti agli spostamenti del sistema di isolamento e alle forze indotte all'interno dello stesso.

### 1.2.1 Il controllo attivo

La tecnologia del controllo attivo è caratterizzata dalla presenza di una forza di controllo in grado di modificare la risposta della struttura; tale forza di controllo è generata attraverso un segnale di controllo, basato sui risultati calcolati dalla risposta della struttura attraverso uno specifico algoritmo.

Dal punto di vista matematico, tale sistema di controllo modifica la risposta strutturale intervenendo sul termine  $F(\ddot{u}, \dot{u}, u, t)$  dell'equazione 1.1, la quale può essere proporzionale allo spostamento misurato, alla velocità, e/o accelerazione della struttura durante gli eventi sismici.

Questo sistema sfrutta l'utilizzo di sensori e dispositivi elettronici per monitorare la risposta strutturale, che necessitano di una continua e attenta manutenzione per poter rispondere ottimamente all'evento sismico anche decine di anni dopo l'installazione. Nel caso di malfunzionamenti la struttura risulta estremamente vulnerabile. Tale tipo di controllo può essere realizzato con attuatori idraulici per la movimentazione di masse inerziali, richiedendo quindi l'utilizzo di notevole potenza da parte del sistema. Un esempio di protezione sismica degli edifici con controllo attivo è dato dall'installazione sulla sommità degli edifici di attuatori idraulici che movimentano masse appoggiate su rulli, creando in questo modo forze inerziali in controfase, ossia in opposizione alle oscillazioni prodotte da vento o evento sismico. La risposta sismica risulta efficace per un ampio *range* di frequenze e intensità. In caso di malfunzionamento del sistema, la struttura si trova in condizioni non protette, dunque è richiesta un'attentissima manutenzione durante tutta la vita della struttura.

### 1.2.2 Il controllo passivo

Il controllo passivo comprende l'isolamento *vero e proprio*, ovvero agisce per ridurre l'energia sismica in entrata nel sistema, e la dissipazione di energia, cioè la necessità di dissipare l'energia che comunque è entrata nella struttura prevedendo dei sistemi appositi. Nel controllo passivo non è presente la forza di controllo  $F(\ddot{u}, \dot{u}, u, t)$  che compare a secondo membro nell'equazione 1.1.

La massa, lo smorzamento e la rigidezza, i quali rappresentano i primi tre termini dell'equazione 1.1 vengono modificati inserendo i dispositivi di controllo passivo nella struttura. Il dispositivo usato per modificare la matrice delle masse è chiamato dissipatore di massa. Qualsiasi altro dispositivo utilizzato per modificare il secondo e il terzo termine a primo



membro dell'equazione 1.1 è chiamato dissipatore di energia.

Apparecchi basati sull'azione di fluidi viscosi, che producono forze fortemente dipendenti dalla velocità relativa tra le due estremità dei dispositivi sono chiamati *dispositivi dipendenti dalla velocità*. Analogamente, un dispositivo basato sull'attrito o sullo snervamento di un materiale producendo una forza interna dipendente dallo spostamento relativo tra le due estremità del dispositivo è chiamato *dispositivo dipendente dallo spostamento*.

Tale tipo di controllo può essere attuato sfruttando una serie di dispositivi (PED) (T.T. Soong e Spencer Jr, 2002):

- ◇ Dissipatori metallici;
- ◇ Dissipatori ad attrito;
- ◇ Dissipatori viscoelastici solidi;
- ◇ Dissipatori viscoelastici (VE) o viscosi fluidi (VF);
- ◇ Dissipatori “tuned mass” (TMD);
- ◇ Dissipatori “tuned liquid” (TLD).

Esso si basa esclusivamente sullo sfruttamento di caratteristiche meccaniche del dispositivo stesso.

Solitamente i diversi sistemi passivi di dissipazione sono distinti secondo una classificazione prestazionale, brevemente riassunta in tabella. In generale la dissipazione di energia può essere ottenuta o per trasformazione di energia cinetica in calore o per trasferimento di energia fra modi di vibrare.

Il primo meccanismo include i dispositivi isteretici, che dissipano energia indipendentemente dalla velocità di applicazione del carico, e i dispositivi viscoelastici che invece sono dipendenti dalla velocità. Tra i primi vi sono i dispositivi basati sullo snervamento dei metalli e sull'attrito tra superfici scorrenti, mentre degli altri fanno parte i dispositivi che utilizzano la

deformazione di fluidi o solidi viscoelastici e quelli che utilizzano l'estrusione di fluidi attraverso orifizi. Una terza categoria è costituita dai dispositivi ricentranti che utilizzano un precarico iniziale, generato da molle interne o fluidi pressurizzati, per ottenere un comportamento forza-spostamento che include il ricentraggio del sistema.

Il secondo meccanismo è impiegato negli assorbitori dinamici di vibrazioni. In questi sistemi vengono introdotti ulteriori oscillatori, aggiungendo ulteriori massa, rigidità e smorzamento. Per migliorare le prestazioni della struttura primaria questi dispositivi devono essere adeguatamente sincronizzati.

CLASSIFICAZIONE DEI DISPOSITIVI	PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO	MATERIALI E TECNOLOGIA	OBIETTIVI PRESTAZIONALI
Dispositivi isteretici	Snervamento dei metalli	Acciaio o piombo	Dissipazione di energia
	Attrito	Contatto metallo-metallo o metallo-metallo	Aumento di resistenza
Dispositivi viscoelastici	Deformazione di solidi viscoelastici	Polimeri viscoelastici	Dissipazione di energia
	Deformazione di fluidi viscoelastici	Fluidi altamente viscosi	Aumento di rigidità
	Estrusione di fluidi	Fluidi: design avanzato di orifizi e guarnizioni	
Dispositivi ricentranti	Fluidi pressurizzati ed orifizi	Fluidi compressibili, guarnizioni ad alta pressione	Dissipazione di energia
	Attrito-molle	Contatto Metallo-metallo o Metallo-metallo	Aumento di resistenza
	Materiali a trasformazione di fase	Leghe a memoria di forma, comportamento super elastico	Capacità ricentranti
Assorbitori dinamici di vibrazioni	Oscillatori con masse sincronizzate	Masse-molle-dissipatori fluidi	Aumento dello smorzamento
	Oscillatori con liquidi sincronizzati	Taniche d'acqua, contenitori ad U di liquidi	Aumento dello smorzamento

**Tabella 1.1.** Classificazione sistemi passivi di dissipazione

In fase di progettazione si può calibrare la risposta sismica in relazione ad un solo determinato terremoto di riferimento. In base alle norme vigenti i dispositivi passivi vengono

dimensionati e calibrati in riferimento all'evento sismico di progetto con massima intensità. Inevitabilmente quindi la migliore risposta sismica della struttura si avrà solamente nel caso si verificasse l'evento sismico di riferimento, e quindi non solo eventi di maggiore intensità (eccezionali) ma anche le scosse di entità ridotta potrebbero rendere inefficace il sistema di isolamento.

### 1.2.3 Il controllo ibrido (semiattivo)

La combinazione di controllo attivo e passivo è chiamata controllo ibrido, il quale però richiede comunque una grande forza di controllo, non presente nel sistema passivo. Il controllo semiattivo invece richiede forze di controllo di minore entità che vanno ad aumentare l'efficacia del sistema di controllo passivo sotto forma di *on/off switch*.

Esso utilizza forze comunque presenti all'interno della struttura, richiede una bassissima potenza e, in caso di malfunzionamento, garantisce comunque un certo livello di protezione passiva. Il problema della lentezza dei sistemi attivi e della parziale efficacia dei sistemi passivi, è stato superato con la filosofia del controllo semiattivo, in cui le forze richieste vengono messe a disposizione dal terremoto stesso grazie alla deformazione di opportuni controventi d'acciaio installati fra punti della struttura naturalmente sottoposti a spostamento relativo, e da una nuova generazione di dissipatori energetici in grado di cambiare le proprie caratteristiche in modo pressoché istantaneo.

Un tale sistema per il controllo semiattivo delle vibrazioni delle strutture è stato messo a punto con successo nell'ambito del Progetto Europeo SPACE. Tale sistema è basato su dispositivi oleodinamici contenenti un fluido magnetoreologico (MR), in grado cioè di variare le proprie caratteristiche meccaniche (in particolare la viscosità) al variare del campo magnetico in cui si trova immerso. A sua volta, il campo magnetico può essere agevolmente modificato controllando una corrente di bassa potenza che passa in circuiti elettrici opportunamente collocati attorno al dispositivo: con un semplice *click* è possibile, in pochi millisecondi, aumentare anche di 50 volte la rigidità del dispositivo, esattamente come il nostro cervello ordina ai

muscoli di tendersi o allungarsi per mantenere il corpo in equilibrio. I dispositivi MR vengono in genere posti fra 'pavimento' e 'soffitto' di una struttura tramite un controvento flessibile. Quando viene fatta passare corrente nel circuito, i dispositivi diventano rigidi (condizione detta MR 'on') ed il controvento elastico viene deformato e accumula energia. Interrompendo il flusso di corrente, il dispositivo diventa meno rigido (MR 'off') ed il controvento ritorna nella sua posizione iniziale, dissipando l'energia precedentemente accumulata. Gli istanti in cui ciò deve accadere sono stabiliti da un opportuno algoritmo di controllo, inserito in un computer collegato ad una rete di sensori opportunamente distribuiti sulla struttura.

La prima applicazione di tale sistema riguarda un ponte pedonale costruito a Forchheim, nei pressi di Norimberga, in Germania. Queste strutture sono in genere estremamente flessibili, dato che non devono sopportare pesi eccessivi. Pertanto, entrano facilmente in vibrazione non solo sotto l'azione del sisma, ma anche del vento e delle vibrazioni causate dal transito pedonale. I pedoni possono essere molto diversi in numero (e quindi in peso); inoltre possono camminare, correre, oppure addirittura saltare volutamente, generando così input vibratori difficili da controllare efficacemente con un unico dispositivo passivo.

## 1.3 Basi teoriche dell'isolamento sismico

### 1.3.1 Approccio energetico

L'azione sismica può essere interpretata dal punto di vista energetico, ovvero si sfruttano dei dispositivi che possano disaccoppiare il moto del terreno da quello della struttura, facendo in modo che l'energia sismica in *input* venga ridotta (meccanismo di isolamento sismico). Oppure si utilizzano dispositivi che possano dissipare attraverso cicli isteretici l'energia che è comunque entrata nella struttura sotto forma di energia di deformazione. Tale dissipazione permette di ridurre sia gli spostamenti alla base, sia le forze trasmesse alla sovrastruttura.

La formulazione energetica presenta il vantaggio di sostituire quantità vettoriali (per esempio gli spostamenti, velocità e accelerazioni), con quantità scalari (contributi energetici).

Da un punto di vista matematico, partendo dalla classica equazione del moto per un SDOF, si può scrivere (Uang e Bertero, 1990):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + h(x, \dot{x}) = -m\ddot{u}_g \quad (1.2)$$

la quale può essere integrata fra 0 e  $t$  ottenendo:

$$\int_0^t m\ddot{x}dx + \int_0^t c\dot{x}dx + \int_0^t kx dx + \int_0^t h(x, \dot{x})dx = - \int_0^t m\ddot{u}_g dx \quad (1.3)$$

ed esprimendo i singoli contributi dal punto di vista energetico si scrive più chiaramente:

$$\underbrace{E_k + E_v + E_e + E_h}_{CAPACITA'} = \underbrace{E_i}_{RICHIESTA} \quad (1.4)$$

Avendo indicato con:

$E_k$  energia cinetica;

$E_v$  energia dissipata per fenomeni viscosi;

$E_e$  energia di deformazione elastica;

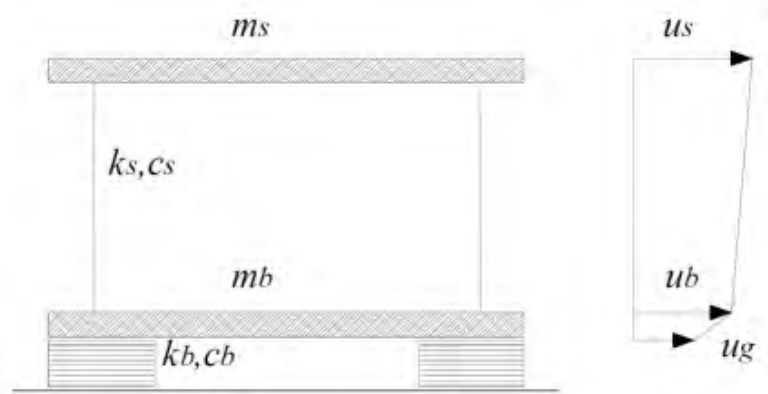
$E_h$  energia dissipata per fenomeni isteretici

$E_i$  energia in ingresso.

Dunque è chiaro che si può agire o abbattendo l'energia in ingresso ( $E_i$ ), o dissipando l'energia sismica accumulata nel sistema ( $E_h$  ed  $E_v$ ), oppure addirittura creando una sinergia tra i due sistemi che permetta di ridurre l'energia immessa nel sistema e dissiparne quella frazione attraverso opportuni dispositivi.

### 1.3.2 Approccio dinamico

Di seguito si riporta un breve riassunto del comportamento dinamico di un modello a due masse, come presentato da Kelly e Naeim, 1999. Il comportamento di un edificio isolato può essere ottenuto utilizzando un semplice modello a due gradi di libertà in cui la massa  $m_s$  rappresenta la sovrastruttura e la massa  $m_b$  rappresenta la massa a livello del piano di isolamento. Si presume che tutti gli elementi strutturali siano linearmente elastici con smorzamento viscoso lineare. Poiché la maggior parte dei sistemi di isolamento sono intrinsecamente non lineari, questa analisi sarà una approssimazione in cui la rigidezza e lo smorzamento efficace dovranno essere stimati a partire da un processo di linearizzazione equivalente. I parametri del modello sono riportati in figura 1.15:



**Figura 1.15.** Sistema a due gradi di libertà per la schematizzazione di una struttura con isolamento sismico (Kelly e Naeim, 1999)

Per semplificare la trattazione conviene ragionare in termini di spostamenti relativi, introducendo le due quantità:

$$\begin{cases} v_b = u_b - u_g \\ v_s = u_s - u_b \end{cases}$$

dove  $u_g$  rappresenta lo spostamento del suolo,  $v_b$  rappresenta lo spostamento degli isolatori e  $v_s$  rappresenta il *drift* interpiano.

Applicando il principio di D'Alembert si possono scrivere le due equazioni del moto, espresse in termini di queste quantità:

$$\begin{cases} (m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \\ m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \end{cases}$$

Tali espressioni possono anche essere riscritte in forma matriciale:

$$M\ddot{\mathbf{v}} + C\dot{\mathbf{v}} + K\mathbf{v} = -M\mathbf{r}\ddot{u}_g$$

Si derivano gli spostamenti relativi da quelli assoluti riportati in figura 1.15,  $d_s = u_s$  e  $d_b = -u_g$ . La pulsazione della struttura a base fissa è pari a  $\omega_s = \sqrt{k_s/m_s}$ , la pulsazione del sistema isolato è invece pari a  $\omega_b = \sqrt{k_b/(m_s + m_b)}$  e si assume che queste siano molto distanti tra loro.

Il rapporto delle pulsazioni al quadrato  $\varepsilon = \omega_b^2/\omega_s^2$ , generalmente compreso tra  $10^{-1}$  e  $10^{-2}$ , determina una misura della distanza tra le due pulsazioni. È necessaria anche la definizione di un rapporto tra le masse  $\gamma = \frac{m_s}{m_s + m_b} = \frac{m}{M}$  in ogni caso sempre minore di 1.

I fattori di smorzamento per la sovra-struttura ed il sistema isolato sono rispettivamente  $\beta_s = \frac{c_s}{2m_s\omega_s}$  e  $\beta_b = \frac{c_b}{2\omega_b(m_s + m_b)}$  e sono in genere dello stesso ordine di grandezza di  $\varepsilon$ .

E' possibile riscrivere le equazioni del moto del sistema:

$$\begin{cases} \ddot{v}_b + \gamma\ddot{v}_s + 2\omega_b\xi_b\dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -u_g \\ \ddot{v}_b + \ddot{v}_s + 2\omega_s\xi_s\dot{v}_s + \omega_s^2 v_s = -u_g \end{cases}$$

Le grandezze  $\omega_b, T_b, \xi_b$  e  $\omega_s, T_s, \xi_s$  rappresentano pulsazione, periodo e rapporto di smorzamento di due oscillatori elementari, il primo costituito dalla totalità della massa vincolata al sistema di isolamento, il secondo formato solo dalla sovrastruttura, considerata incastrata alla base.

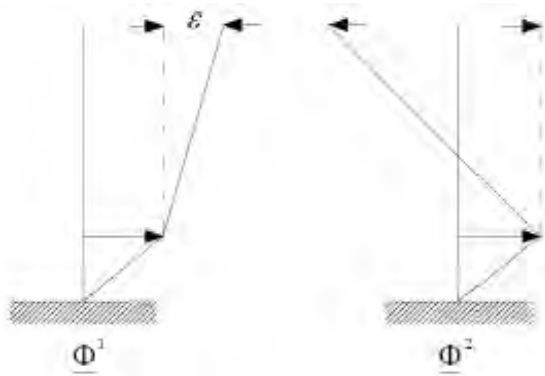
Risolvendo il problema agli autovalori si definiscono i due modi di vibrare della struttura. Si assume  $\varepsilon \ll 1$ , ovvero una sovrastruttura molto più rigida degli isolatori, così da semplificare notevolmente il problema. Così si ottengono le espressioni semplificate delle pulsazioni modali:

$$\begin{cases} \omega_1^2 = \omega_b^2 \cdot (1 - \gamma \cdot \varepsilon) \\ \omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{(1-\gamma)} \cdot (1 + \gamma \cdot \varepsilon) \end{cases}$$

Le forme modali invece si possono scrivere come

$$\begin{cases} \underline{\phi}_1^T = \{1, \varepsilon\} \\ \underline{\phi}_2^T = \left\{1, -\frac{1}{\gamma} \cdot [1 - (1 - \gamma) \cdot \varepsilon]\right\} \end{cases}$$

La figura 1.16 mostra le prime due forme di vibrazione del modello a due gradi di libertà che descrive il sistema con isolamento.



**Figura 1.16.** Prime due forme di vibrazione del sistema a due gradi di libertà per la schematizzazione di una struttura con isolamento sismico (Kelly, 1990)

La sovrastruttura rimane quasi indeformata nella forma modale  $\Phi^1$ , mentre la forma modale  $\Phi^2$  determina deformazioni dello stesso ordine di grandezza per isolatore e sovrastruttura, ma in direzione opposta. La prima forma modale mette in luce l'efficacia dell'isolamento, se si introduce una rigidezza sufficientemente piccola le deformazioni sulla sovrastruttura sono molto ridotte, e la quasi totalità della deformazione è concentrata a livello dell'isolatore.



La seconda forma modale invece evidenzia che elevate accelerazioni che eccitano il secondo modo di una struttura isolata non sono accompagnate da un taglio alla base proporzionale alla somma delle masse, poiché queste si muovono in contrapposizione.

Introducendo i modi di vibrare si possono disaccoppiare le equazioni del moto:

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 + 2 \cdot \omega_1 \cdot \xi_1 \cdot \dot{q}_1 + \omega_1^2 \cdot q_1 = -\pi_1 \cdot \ddot{u}_g \\ \ddot{q}_2 + 2 \cdot \omega_2 \cdot \xi_2 \cdot \dot{q}_2 + \omega_2^2 \cdot q_2 = -\pi_2 \cdot \ddot{u}_g \end{cases}$$

dove  $\pi_1$  e  $\pi_2$  rappresentano i coefficienti di partecipazione modale. Sotto le ipotesi assunte possono essere scritti come:

$$\begin{cases} \pi_1 = 1 - \gamma \cdot \varepsilon \\ \pi_2 = \gamma \cdot \varepsilon \end{cases}$$

## 1.4 Cenni sulla dissipazione energetica e background storico

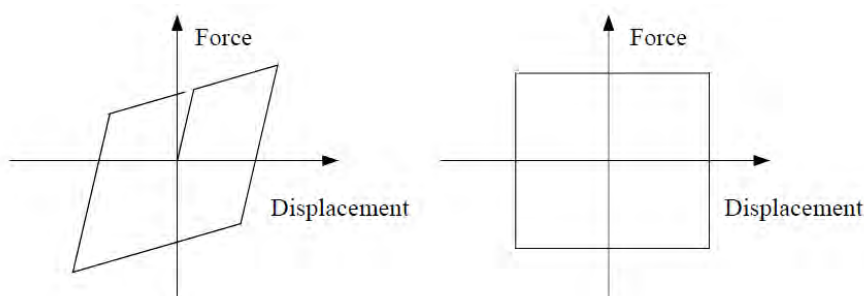
Osservando l'equazione di bilancio dell'energia 1.4 (Bertero e Uang, 2003) si può notare che l'energia in ingresso nella struttura, isolata o a base fissa, può essere dissipata sfruttando vari contributi energetici. In particolare si utilizzano i contributi viscosi e isteretici per procurare alla struttura adeguate capacità dissipative, e garantire la resistenza di quest'ultima alle azioni gravitazionali anche dopo il sisma.

La dissipazione energetica può essere prevista internamente al dispositivo utilizzato per l'isolamento sismico, oppure la struttura può essere dotata di apparecchi che svolgono la funzione specifica di dissipatori energetici.

La dissipazione avviene in modi diversi a seconda della tipologia di dispositivo che è stato installato (viscoso, viscoelastico, elastoplastico) e del materiale usato (olio, gomma, acciaio). L'energia fornita in *input* dal sistema alla struttura resta invariata, ma viene per lo più assorbita e dissipata nei dispositivi, riducendo così le sollecitazioni nell'edificio.

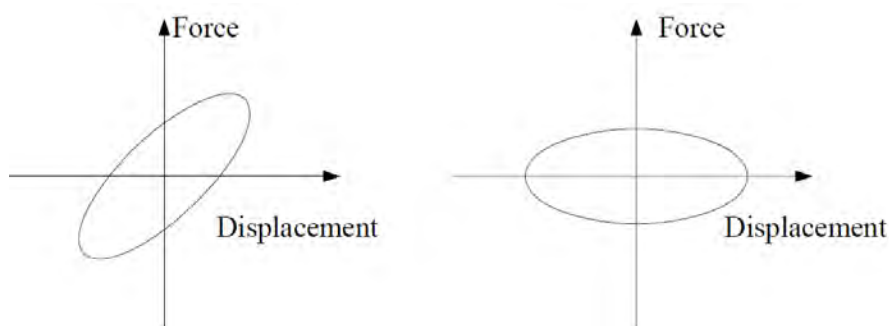
I sistemi di dissipazione energetica si distinguono in due grandi categorie: dissipatori dipendenti dallo spostamento e dissipatori dipendenti dalla velocità.

I principali sistemi di dissipazione dipendenti dallo spostamento sono quelli basati sullo snervamento dei metalli e quelli basati sull'attrito, i cui cicli isteretici sono riportati in figura 1.17.



**Figura 1.17.** Cicli isteretici dissipatori: (a) ciclo di un dissipatore elasto-plastico , (b) ciclo di un dissipatore ad attrito (Marsico, 2009)

I principali sistemi di dissipazione dipendenti dalla velocità sono quelli basati sulla deformazione di un materiale visco-elastico e quelli basati sul passaggio forzato di fluido viscoso attraverso appositi orifizi calibrati. In figura 1.18 sono riportati i cicli isteretici dei dissipatori dipendenti dalla velocità:



**Figura 1.18.** Cicli isteretici dissipatori: (a) dissipatore visco-elastico; (b) dissipatore fluido-viscoso (Marsico, 2009)

Gli smorzatori visco-elastici solidi sfruttano materiali polimerici o vetrosi che dissipano energia per effetto delle deformazioni tangenziali (questa tipologia di dissipatori è ormai superata poiché permette una limitata dissipazione), mentre quelli fluido-viscosi si basano

sulla deformazione di oli siliconici e sul passaggio degli stessi attraverso cavità appositamente studiate.

## 1.5 Dispositivi di isolamento sismico

I dispositivi di isolamento sismico devono possedere determinate caratteristiche (Dolce et al., 2010) essenziali:

1. capacità di sostenere i carichi statici verticali (funzione di appoggio) in condizione di riposo e sismica;
2. grande deformabilità (o bassa rigidezza) in direzione orizzontale (parallela all'azione del terremoto);
3. resistenza ai carichi orizzontali non eccezionali (vento, traffico, ecc.);
4. (addizionale) capacità di ricentraggio del dispositivo al termine del sisma.

Vi sono poi altre qualità che possono influire economicamente/progettualmente sulla scelta del dispositivo, ad esempio: durabilità, facilità di installazione, costi contenuti, ingombro limitato. Tali caratteristiche possono influire nella scelta finale del dispositivo, ma non interferiscono con le sue prestazioni meccaniche in condizioni di installazione e manutenzione corretta.

Gli obiettivi prestazionali di un sistema di isolamento si possono riassumere sinteticamente in tre punti:

- (a) minimizzare il taglio alla base della struttura;
- (b) minimizzare lo spostamento alla base della struttura;
- (c) minimizzare le accelerazioni di piano ad alte frequenze.

Gli isolatori sono generalmente apparecchi d'appoggio di tipo bidirezionale, con elevata rigidità in direzione ortogonale al suolo ma molto deformabili orizzontalmente, e possono o meno svolgere anche la funzione di dissipatori di energia.

Gli isolatori utilizzati attualmente si possono suddividere in due grandi categorie:

- (a) isolatori in materiale elastomerico ed acciaio, basati sulla grande deformabilità elastica della gomma;
- (b) isolatori a scorrimento, basati sulla bassa resistenza d'attrito tra superfici opportunamente trattate.

### 1.5.1 Isolatori elastomerici

Gli isolatori elastomerici sono costituiti da strati alterni di acciaio (di 2-3 mm) e di elastomero (di spessore tra 5-20 mm) collegati tra loro mediante vulcanizzazione. Sono realizzati con mescole elastomeriche che a seconda della composizione garantiscono uno smorzamento viscoso equivalente più o meno elevato e una deformazione a taglio del 100%. Può essere usata gomma naturale o gomma sintetica per la produzione di questi oggetti. I lamierini d'acciaio esplicano un'azione confinante sull'elastomero, limitandone la deformabilità verticale (in modo da contenere tra 1 e 3 mm l'abbassamento dell'isolatore sotto i carichi d'esercizio) ma senza influenzare significativamente la deformabilità tagliante e sono generalmente più corti rispetto agli strati di gomma, così da risultare completamente inglobati per essere protetti dalla corrosione.

Variando la composizione della gomma e inserendo elementi metallici si possono ottenere notevoli capacità dissipative evitando di dover impiegare dispositivi di smorzamento ausiliari.

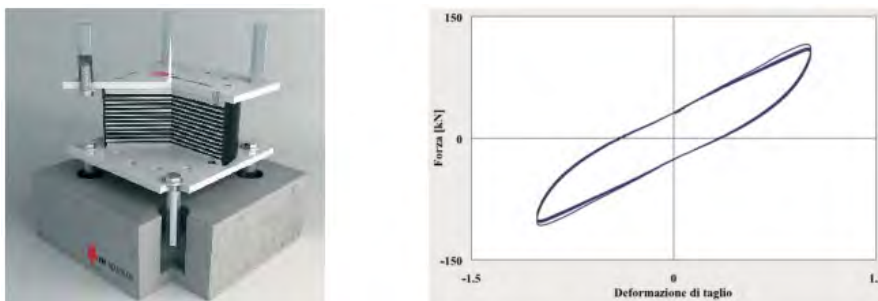


Figura 1.19. Isolatore elastomerico e relativo ciclo isteretico

#### 1.5.1.1 Isolatori elastomerici a basso smorzamento (Low Damping Rubber Bearings - LDRB)

Questi dispositivi presentano un comportamento meccanico che può essere considerato pressoché elastico, la loro rigidezza rimane quasi costante al crescere della deformazione ed hanno un rapporto di smorzamento molto basso (tra il 2-4%). Sono poco sensibili alla temperatura, semplici da modellare e presentano un comportamento sostanzialmente indipendente dalla frequenza di oscillazione. Hanno inoltre un *creep* molto contenuto per carichi di lunga durata.

Lo svantaggio risiede nel dover accompagnare questi dispositivi ad un sistema di dissipazione per evitare movimenti troppo elevati della struttura.

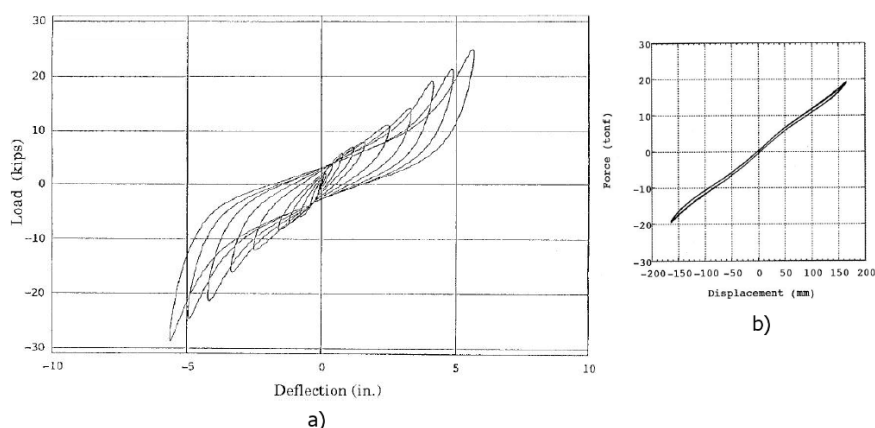
#### 1.5.1.2 Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento (High Damping Rubber Bearings - HDRB)

Tali isolatori sono ottenuti utilizzando delle gomme additivate con sostanze (quali resine, oli, nerofumo, silicio, ecc.) che consentono di incrementare i valori di smorzamento fino al 10-20%, per deformazioni a taglio dell'ordine del 100%.

L'energia viene dissipata in parte attraverso la viscosità, dunque con una legge quadratica con lo spostamento, in parte per isteresi, dunque con una legge lineare con lo spostamento (Figura 1.19). Questo implica una dipendenza del comportamento meccanico dalla frequenza di oscillazione, inoltre anche la temperatura comincia a giocare un ruolo importante. All'aumentare della deformazione si assiste ad un incremento del modulo di taglio ( $G$ ) determinando un significativo incrudimento nel ciclo forza-spostamento dell'isolatore.

Con questi dispositivi si può realizzare un sistema di isolamento completo, dato che possiedono adeguate capacità dissipative, la rigidezza iniziale limita gli spostamenti sotto carichi non sismici e il loro comportamento quasi-elastico garantisce ottime capacità di ricentraggio. Le proprietà meccaniche di questi isolatori variano molto durante i primi cicli di deformazione, a causa di un cambiamento a livello molecolare della gomma, fenomeno noto come "*scragging*" (Morgan e Whittaker, 2001).

Inoltre J.M. Kelly et al. nel 1985 dimostrarono che l'elevato smorzamento permette di ridurre le vibrazioni ambientali, in quanto gli isolatori fungono da filtri per le vibrazioni ad alte frequenze (per esempio il traffico).



**Figura 1.20.** Isolatore elastomerico HDRB (a); Isolatore elastomerico LDRB (Onorio, 2009b)(b)

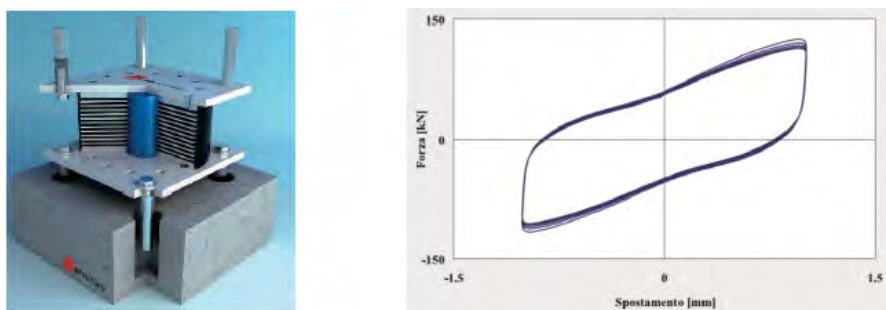
### 1.5.1.3 Isolatori elastomerici con nucleo in piombo (Lead Rubber Bearings - LRB)

Questi apparecchi furono inventati in Nuova Zelanda nel 1975 e sono costituiti da strati alterni di acciaio e di elastomero (gomma) collegati tra loro mediante vulcanizzazione e da uno o più inserti cilindrici in piombo, disposti in appositi fori verticali in modo da ottenere un'adeguata rigidità per i carichi orizzontali non eccezionali, ma allo stesso tempo garantendo una notevole capacità di dissipazione sotto sisma.

Il comportamento meccanico risultante è una combinazione di quello elastico lineare degli appoggi elastomerici a basso smorzamento con quello elasto-plastico del nucleo in piombo sottoposto ad un regime di deformazione di tipo tagliante. L'azione di confinamento svolta dalle piastre d'acciaio assicura la deformazione puramente tagliante del nucleo in piombo. Si ottiene uno smorzamento viscoso equivalente dell'ordine del 15-35% a seconda delle dimensioni del nucleo e dello spostamento imposto.

La rigidità e l'energia dissipata si riducono all'aumentare del numero di cicli, per poi stabilizzarsi intorno ai 10-15 cicli in modo simile allo *scragging* della gomma. Il surriscaldamento del nucleo in piombo in seguito alle oscillazioni ad alta frequenza spiega il motivo di

questo fenomeno. Impiegando nuclei in materiali polimerici ad elevata viscosità si ottengono più spiccate capacità dissipative a fronte di un aumento dell'aliquota viscosa.



**Figura 1.21.** Isolatore elastomerico con nucleo in piombo e relativo ciclo isteretico

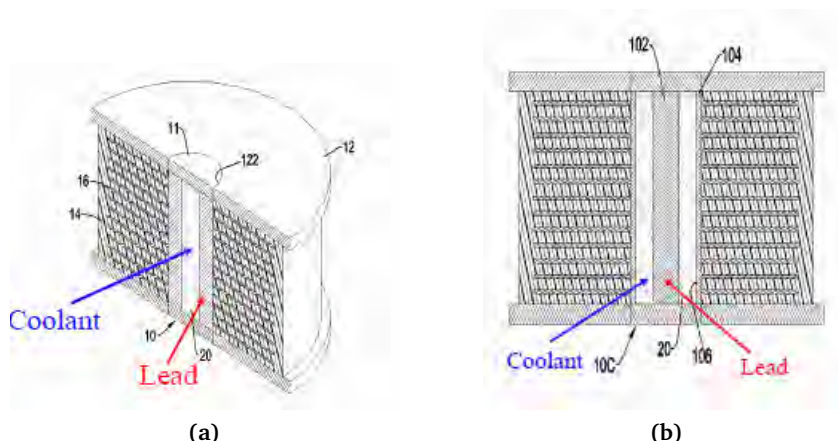
Tutti i dispositivi di isolamento in gomma risentono però di alcune problematiche:

1. la stabilità del dispositivo sotto compressione e taglio;
2. il *creep* dell'elastomero, deformazione sotto carico costante;
3. efficacia dell'aderenza fra gomma e acciaio per spostamenti elevati;
4. variazioni del comportamento meccanico della gomma dovute al variare della temperatura, alla frequenza di oscillazione e all'invecchiamento (Morgan e Whittaker, 2001).
5. riduzione della capacità portante verticale all'aumentare dello spostamento orizzontale, sia per la deformazione a taglio indotta che per la riduzione dell'area di impronta effettiva.

#### 1.5.1.4 CRB - Cooled Rubber Bearing

Questo dispositivo (Figura 1.22a e 1.22b) è stato inventato da Tsai nel 2012, con l'obiettivo di raffreddare il nucleo in piombo degli isolatori LRB, e per mantenere bassa la temperatura della gomma nei HDRB durante i terremoti (Tsai, 2012b).

Durante un sisma la temperatura del nucleo in piombo può raggiungere i 403°C, ma la temperatura di fusione del piombo è di 327°C e quella della gomma varia tra 98 e 178°C, a



**Figura 1.22.** Dispositivo CRB (a), sezione del dispositivo CRB (b)

seconda della sua composizione. Dunque si può utilizzare una sostanza che raffreddi il nucleo (ad esempio l'acqua, che presenta un coefficiente di Poisson pari a 0.5 come la gomma).

### 1.5.2 Isolatori a scorrimento

Gli isolatori a scorrimento derivano dalle soluzioni più antiche e semplici. Nella loro forma più basilare prevedono lo scorrimento di due superfici a contatto tra loro.

Questi dispositivi possono essere divisi in due categorie:

- (a) dispositivi unidirezionali, generalmente utilizzati per i ponti, essendo essi caratterizzati da un comportamento totalmente diverso nelle due direzioni, e necessitando solitamente di un sistema di isolamento solo per la direzione longitudinale;
- (b) dispositivi multidirezionali, generalmente impiegati negli edifici, dato che si tende ad ottenere un comportamento isotropo.

In questi isolatori si impiegano materiali come l'acciaio lucidato ed il PTFE (Teflon) o altri materiali polimerici che sviluppano una bassa resistenza d'attrito al contatto.

Per il PTFE il coefficiente di attrito dinamico risulta essere compreso tra il 6% e il 18%, riducendosi all'1-3% nel caso di lubrificazione delle superfici. Questo coefficiente è funzione di (Bondonet e Filiatrault, 1997):



- (a) pressione di contatto (si assiste ad una variazione lineare del coefficiente con la pressione);
- (b) velocità di scorrimento;
- (c) temperatura;
- (d) livello di usura (deterioramento delle superfici di scorrimento all'aumentare del numero di cicli);

Normalmente si trascura la dissipazione di energia per attrito nel dispositivo, a causa della variabilità del coefficiente e delle incertezze sulle condizioni ambientali (temperatura, umidità, pulizia).

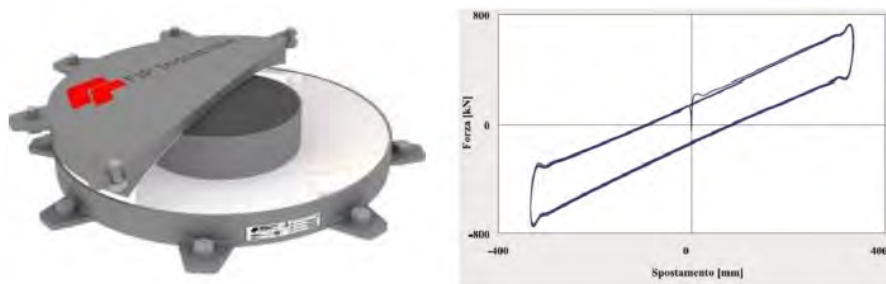


Figura 1.23. Isolatore a scorrimento e relativo ciclo isteretico

Questi isolatori normalmente vengono sempre abbinati ad altri dispositivi in quanto non sono in grado di fornire adeguate capacità dissipative e non possiedono alcuna capacità di ricentraggio al termine dell'azione sismica.

#### 1.5.2.1 Isolatori a pendolo ad attrito (Friction Pendulum System - FPS)

Questi sono gli unici dispositivi a scorrimento che incorporano la funzione ricentrante e dissipativa senza l'aggiunta di altri elementi. Ciò deriva dall'impiego di superfici di scorrimento di tipo curvo non lubrificate, dunque in grado di garantire il ricentraggio, ma anche di dissipare energia.

Una scelta oculata del raggio di curvatura delle superfici permette di calibrare il periodo di oscillazione della struttura, il quale è sostanzialmente indipendente dalla massa sovrastante

(al contrario della rigidità orizzontale).

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$$

Si riesce infatti ad avere una maggiore rigidità iniziale grazie all'attrito statico, infatti la forza necessaria per innescare il moto del dispositivo è maggiore di quella necessaria per farlo proseguire. Lo smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  dipende dal coefficiente d'attrito  $\mu$ , dallo spostamento  $D$  e dal raggio di curvatura  $R$ :

$$\xi = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\mu}{\frac{4\pi^2 D}{gT^2} + \mu} \right)$$

Dunque lo smorzamento viscoso equivalente aumenta al crescere del periodo e del coefficiente di attrito, e si può arrivare a valori del 20%.

Una variazione recente di questo dispositivo è costituita dal doppio pendolo ad attrito (**Double Concave Friction Pendulum - DCFP**) dove si hanno due superfici di scorrimento anziché una. Il vantaggio di questo dispositivo risiede nel fatto che per la stessa azione laterale può consentire uno spostamento doppio, ripartendo la corsa tra le due calotte del dispositivo.

In seguito ad uno spostamento la forza ricentrante si calcola come:

$$F_r = \frac{W}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} u$$

dove  $W$  è il carico gravante sull'isolatore,  $R_1$  e  $R_2$  sono i raggi di curvatura delle due superfici (di solito uguali),  $h_1$  e  $h_2$  sono le altezze parziali e  $u$  è lo spostamento totale.

Uno dei vantaggi di questi dispositivi è la bassa manutenzione, infatti il Teflon protegge efficacemente le superfici dalla corrosione, e invecchiamento e variazioni di temperatura influiscono pochissimo le proprietà meccaniche.

I problemi principali sono invece le notevoli dimensioni in pianta (a fronte di uno spessore contenuto e inferiore rispetto ai dispositivi elastomerici), l'associazione di spostamenti

orizzontali e verticali che possono produrre effetti parassiti sulla struttura e l'affidabilità nel tempo dell'attrito tra le superfici di contatto.

### 1.5.3 Isolatori a rotolamento

I dispositivi a rotolamento presentano un comportamento simile a quello degli isolatori ad attrito, ma in questo caso invece di attrito radente si è in presenza di attrito volvente. Questi dispositivi si differenziano tra loro per il tipo di meccanismo di rotolamento (sfere, rulli, ecc.).

Il principale svantaggio presentato da questa tipologia di dispositivi era il mancato controllo sugli spostamenti della struttura isolata, ma si è cercato di superarlo alloggiando le sfere in superfici concave e non piane. Inoltre essendo il coefficiente di attrito volvente tipicamente molto più piccolo di quello di attrito radente, risulta spesso necessario inserire degli apparecchi all'interfaccia tra struttura e fondazione che possano sopportare i carichi di minore entità, quali vento e vibrazioni ambientali.

Di seguito si riporta una tabella che riassume vantaggi e svantaggi dei sistemi di isolamento trattati:

TIPO DI ISOLATORE	VANTAGGI	SVANTAGGI
ELASTOMERICO	Basse accelerazioni di piano; Costo ridotto;	Spostamenti elevati; Basso smorzamento; Scarsa resistenza al carico di servizio; Momenti P-delta alla base e alla sommità;
ALTO SMORZAMENTO	Moderate accelerazioni di piano;  Resistenza al carico di servizio; Moderato-alto smorzamento;	Rigidezza e smorzamento indipendenti dalle deformazioni; Analisi complessa; Limitata scelta di rigidezza e spostamento; Momenti P-delta alla base e alla sommità
NUCLEO IN PIOMBO	Moderate accelerazioni di piano; Ampia scelta per rigidezza e spostamento;	Momentì P-delta alla base e alla sommità;
SCORRIMENTO CON SUPERFICIE CURVA	Resistenza al carico di servizio;  Moderato-alto smorzamento;  Riduzione della risposta torsionale;	Elevate accelerazioni di piano;  Proprietà funzione di pressione e velocità;

## 1.6 Dispositivi di isolamento sismico per strutture leggere

Mentre negli ultimi decenni i principali studi e applicazioni eseguiti nel campo dell'isolamento sismico miravano verso l'isolamento di strutture civili, negli ultimi anni l'attenzione è stata dedicata anche alla protezione del contenuto, considerando strutture leggere che possono avere valore estremamente elevato, talvolta anche superiore rispetto a quello della struttura nella quale sono contenute (Fig. 1.24). Questa diversa prospettiva rappresenta una nuova sfida a livello mondiale.

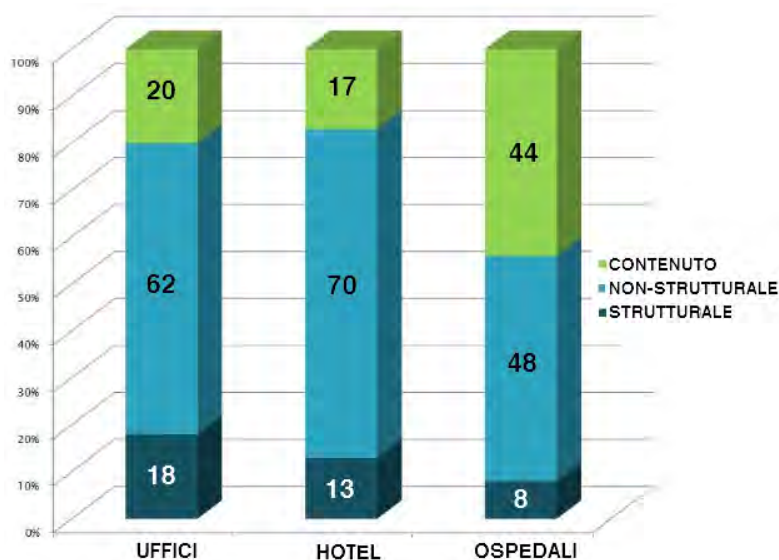


Figura 1.24. Costi nelle strutture civili

Come accennato in precedenza, il valore degli oggetti contenuti può essere rilevante non solo da un punto di vista meramente economico, ma anche culturale o storico, ad esempio per il contenuto dei musei e per gli oggetti d'arte in generale, oppure da un punto di vista strategico e vitale, come nel caso di apparecchiature mediche o elettriche.

Inoltre, l'isolamento delle strutture nelle quali sono contenuti tali preziosi oggetti, potrebbe essere utile ma non sufficiente per impedire il loro danneggiamento sismico, a causa del loro livello di vulnerabilità più elevato rispetto a quello della struttura stessa. Ad esempio, nel caso di edifici dotati di isolatori sismici con controllo passivo, e localizzati in zone ad alto

livello di esposizione sismica come Turchia, Giappone, California e alcune regioni italiane, tali dispositivi risultano essere sovradimensionati per terremoti di bassa intensità, che risultano essere più frequenti rispetto a quello di progetto. In questo caso, i dispositivi elastomerici presenterebbero una rigidità troppo elevata, trasmettendo una parte rilevante dell'energia sismica in ingresso al contenuto. Considerando invece dispositivi a slitta, essi potrebbero presentare una forza di innesco talmente elevata che l'azione sismica sarebbe trasferita interamente alla struttura, come se si trattasse di una base incastrata, ulteriormente amplificata dalla risposta sismica dell'edificio.

Quindi, se è richiesta la protezione sismica del contenuto, e altre tecniche come l'ancoraggio non sono sufficienti o vantaggiose per salvaguardare l'oggetto, è necessario l'isolamento sismico di base. Per lo scopo, è possibile ricalibrare i dispositivi antisismici tipicamente utilizzati nell'ingegneria civile (Berto et al., 2013) al fine di applicarli direttamente al contenuto leggero, sfruttando il fatto che questa tecnologia e le relative conoscenze scientifiche sono già ben note e consolidate. Un'alternativa alla ricalibrazione è la creazione di nuovi dispositivi specificatamente ideati per l'isolamento di strutture leggere.

Anche se i concetti e la teoria dell'isolamento sismico sono sostanzialmente gli stessi, l'applicazione delle tecniche dell'isolamento inizialmente sviluppate per strutture civili alle strutture leggere non è una semplice estensione del problema, bensì richiede attenzioni specifiche:

- le strutture leggere sono spesso molto vulnerabili, anche per le piccole azioni sismiche, dal momento che spesso sono semplicemente appoggiate sulla base senza la possibilità di essere ancorate (a causa di esigenze architettoniche o di conservazione); questo porta alla necessità di progettare un isolamento di base considerando fenomeni come l'oscillazione, il ribaltamento e lo scorrimento;
- gli oggetti leggeri coinvolgono masse di alcuni ordini di grandezza inferiori rispetto a quelle caratteristiche di strutture civili, quindi presentano anche una diversa interazione struttura-dispositivo rispetto a quella classica;

- oltre ad essere tecnicamente efficaci, i sistemi di isolamento alla base di artefatti devono rispettare anche esigenze di conservazione ed estetiche.

Di seguito sono riportate alcune considerazioni riguardanti l'importanza della protezione sismica per tre delle principali categorie di strutture leggere: oggetti d'arte, apparecchiature mediche ed elettriche.

### 1.6.1 Oggetti d'arte

L'importanza di prevenire o attenuare gli effetti devastanti dei terremoti sui beni culturali è davvero essenziale per i paesi in cui questo patrimonio è concentrata, che spesso corrispondono a quelli con più alto livello di esposizione sismica: è il caso dell'Italia e di molti altri siti in bacino del Mediterraneo, quasi tutto il Centro America e paesi asiatici. La sensibilità a questo tema è recentemente cresciuta anche in Italia, a seguito dei terremoti dell'Umbria-Marche (1997), L'Aquila (2009) ed Emilia (2012).

Di seguito sono riportati i principali metodi noti di intervento per la mitigazione del rischio sismico dei manufatti, con particolare attenzione agli interventi effettuati sugli oggetti esposti nella collezione di antichità del Getty Museum (Lowry et al, 2008.):

- un primo approccio consiste nell'abbassare il centro di gravità dell'oggetto, sia aggiustando le proporzioni tra base e altezza, oppure aggiungendo del peso. Alcuni esempi possono essere: aggiungere sabbia nei vasi oppure inserire mattoni o altri oggetti pesanti dentro al fondo dei piedistalli o delle vetrine. Questa soluzione è molto semplice però, a volte, l'aggiunta di peso può essere impraticabile e in altri casi può minacciare la salvaguardia dell'oggetto, nel caso in cui esso non sia strutturalmente abbastanza resistente per accomodare questo sovraccarico senza riportare danni;
- un altro approccio, che ha comunque alcuni vantaggi, consiste nell'ancoraggio degli oggetti usando diversi tipi di supporto che rendono l'oggetto solidale alla struttura, dunque parte integrante di essa. Però, una soluzione di questo tipo implica la trasmissione

completa della forza sismica all'oggetto ancorato il quale è normalmente troppo fragile per resistere a tale sollecitazione.

- un approccio alternativo è l'applicazione dell'isolamento sismico, che si è dimostrato un ottimo sistema che permette di mitigare gli effetti dell'azione sismica, limitando l'energia in *input* nella struttura.



**Figura 1.25.** Rottura della statua di Saturnino Gatti (a) e ribaltamento di una statua decorativa (b)

Di seguito sono riportati alcuni esempi di danni al nostro patrimonio artistico e culturale. Il terremoto dell'Umbria-Marche (1997) ha causato il crollo e la rottura degli affreschi nella Basilica di San Francesco d'Assisi. Anche gli avvenimenti più recenti a L'Aquila (2009) ed in Emilia (2012) hanno evidenziato la necessità di ridurre la vulnerabilità sismica in Italia. La Figura 1.25a mostra i danni subiti dalla statua Saturnino Gatti nel Museo Nazionale d'Abruzzo a L'Aquila, a causa dell'evento sismico del 6 aprile 2009, mentre in Fig. 1.25b è possibile vedere il ribaltamento di una statua decorativa in un giardino privato a San Felice Sul Panaro dopo il terremoto del 21 e 29 maggio 2012 (Borri e De Maria, 2012). Nella Fig. 1.26a viene mostrato il danno alle ceramiche esposte al Nias Heritage Museum, in seguito al terremoto che colpì l'Indonesia il 28 marzo 2005 (Neurohr, 2005).

Un aspetto rilevante da considerare nella protezione sismica di oggetti d'arte è il loro alto valore storico e socio-culturale. Essi richiedono una specifica attenzione negli interventi in modo tale che i requisiti di conservazione sono pienamente rispettati; è anche importante





**Figura 1.26.** Danni a oggetti di valore quali ceramiche (a) e vasellame (b). Nias Heritage Museum, Indonesia (Neurohr, 2005)

garantire un risultato estetico adeguato, il quale deve amalgamarsi perfettamente con il contesto nel quale è inserito.

### 1.6.2 Apparecchiature medicali

Le strutture medicali, assieme alle stazioni di polizia e alle centrali dei vigili del fuoco, sono edifici di vitale importanza durante e dopo un evento sismico, e richiedono dunque una protezione particolare per continuare a garantire la loro operatività.

Il 97% dei feriti si registra entro i primi 30 minuti dalla scossa principale di un terremoto (Gunn, 1995). Eventi come il terremoto del Kashmir (2005) e Sichuan (2008) causarono un enorme numero di feriti, richiedendo una grande capacità di accoglienza agli ospedali che dimostrarono di avere gravi problemi di operatività.

Il comportamento strutturale influenza la risposta delle componenti non-strutturali perchè la maggior parte di esse è connessa rigidamente alla struttura, che trasmette ad esse la forza sismica, eventualmente amplificata (Achour et al., 2011).

Per esempio, a Taiwan, gli ospedali Christian Hospital, il Veteran Hospital e Shiu-Tuan Hospital registrarono leggeri danni strutturali ma disastrosi danni al contenuto non strutturale e ai macchinari in essi contenuti (T.T Soong e Yao, 1999). Il Christian Hospital ridusse la sua capacità del 10% nel momento di maggiore necessità per danni non strutturali e richiese il



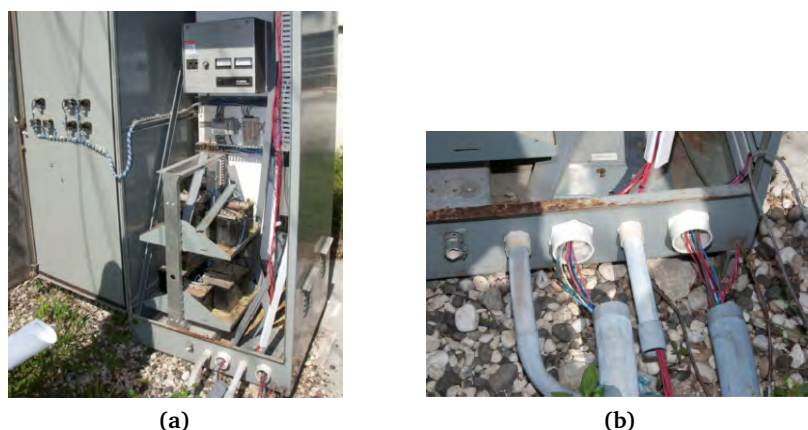
**Figura 1.27.** Danni subiti all'interno del Veteran Hospital (a), e danni all'ospedale di Shiu-Tuan (b)

trasferimento di numerosi pazienti, inoltre si danneggiarono moltissimi strumenti, tra i quali il generatore di emergenza dell'ospedale. Il Veteran Hospital invece ridusse la sua capacità del 50% per danni strutturali e non strutturali e ridusse drasticamente i servizi forniti per danni enormi all'apparecchiatura dell'ospedale (Figura 1.27a). Infine l'ospedale di Shiu-Tuan restò strutturalmente integro ma subì danni non-strutturali devastanti, fu addirittura chiuso causando la morte di numerosi pazienti. I piani che subirono più danni ai macchinari furono il terzo e il quarto, dove erano situate le sale operatorie (Figura 1.27b).

### 1.6.3 Strumentazione elettrica

Macchinari elettrici come trasformatori, *computers* e *servers* ad alte *performances*, *HV (High Voltage) Circuit Breakers* e quadri elettrici sono vulnerabili al danneggiamento da sisma se non progettati, costruiti e installati correttamente. Queste attrezzature, che spesso giocano un ruolo fondamentale durante e dopo gli eventi sismici, comprendono parti interne molto sensibili alle forti accelerazioni (Caldwell, Gatscher e Littler, 2007). Inoltre, normalmente le unità elettriche non sono mai adeguatamente vincolate dunque possono incorrere in fenomeni di *rocking* o *sliding*.

Per esempio in Figura 1.28a si notano chiaramente i danni subiti da una cabina elettrica pubblica localizzata all'ingresso del Port-au-Prince General Hospital (Haiti) per un sisma



**Figura 1.28.** Cabina elettrica danneggiata (a) e danni ai cavi (b)

con una *PGA* (*Peak Ground Acceleration*) di  $0,21g$ . I cavi in arrivo a livello terreno sono stati strappati (Figura 1.28b) per il movimento relativo della cabina sulla sua fondazione, a causa di una mancanza di ancoraggio.

In Figura 1.29a si nota un sistema MELIS (*Metal Enclosed Load Interrupter Switchgear*) installato sul tetto dello stesso ospedale, e lo spostamento da esso subito (Figura 1.29b) a causa del sisma. La base del macchinario non era meccanicamente collegata al basamento in modo sufficiente. Uno dei lati infatti non era stato connesso, di conseguenza, sotto l'azione sismica sono state registrate delle traslazioni della struttura di entità sufficiente da poter causare interruzioni di corrente elettrica, danni sia agli apparecchi collegati in *upstream* che in *downstream* (pompe, trasformatori, ecc.), nonché la distruzione del sistema MELIS.

Le osservazioni svolte ad Haiti dopo il terremoto (Magnitudo 7.0) del 12 gennaio 2010 (Goodno et al., 2011), ad una distanza dalle 13 alle 23 miglia dall'epicentro, confermano che gli elementi non strutturali che non sono propriamente ancorati o vincolati al supporto di base possono subire traslazioni rispetto al proprio supporto tali da interromperne il funzionamento.

Le centrali per la produzione di energia elettrica sono strutture strategiche che devono essere mantenute funzionanti durante e dopo il terremoto. L'interruzione dell'erogazione di energia elettrica può portare a danni gravi dal punto di vista economico e sociale (Oikonomou, Constantinou e Reinhorn, 2012). Forti terremoti come Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995) e Izmit e Chi-Chi (1999) danneggiarono le centrali di produzione elettrica



**Figura 1.29.** Sistema MELIS presente sul tetto dell'edificio (a), e spostamento subito dall'oggetto dopo il sisma (b)

creando danni per centinaia di milioni di dollari per ogni evento più i costi collaterali per la riparazione/sostituzione dei macchinari danneggiati. Inoltre i *blackouts* generarono gravi disagi a livello sociale ed economico, interrompendo tutte le attività umane dipendenti dall'energia elettrica.

Generalmente le modalità di danneggiamento di apparecchiature elettriche, quali un trasformatore soggetto ad un evento sismico sono (Saadeghvaziri e Feng, 2001): il ribaltamento, la rottura dell'ancoraggio che può causare lo strappo dei cavi e perdite d'olio, la rottura delle guarnizioni dell'olio che possono provocare dispersioni nell'ambiente, la traslazione eccessiva se il trasformatore è montato su sistemi a rotaia (usati per la facilità di montaggio/smontaggio e per il circolo dell'aria).

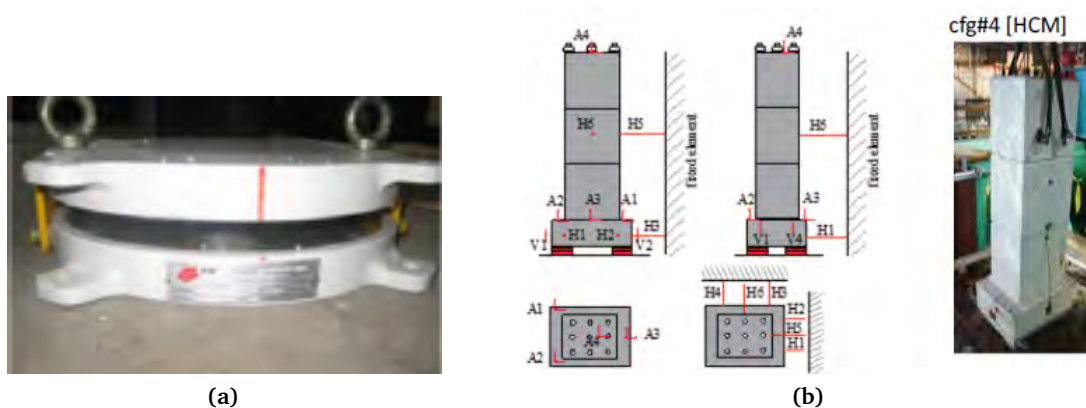
Risulta quindi necessario progettare queste strumentazioni elettriche anche nei confronti delle azioni sismiche, soprattutto attraverso l'utilizzo dell'isolamento sismico di base, utilizzando dispositivi che si possano velocemente installare e rimuovere, in previsione di manutenzioni o *retrofitting* che non interrompano la produzione di energia per un periodo di tempo troppo lungo.

Di seguito saranno presentati, al solo fine di ricostruire un breve stato dell'arte, i dispositivi principali al momento disponibili, quelli in fase di studio, o dei casi-studio particolari che, solo per opportuna scelta organizzativa, rientrano sotto tipologie di slitta, rotolamento, e altri che nn si basano sui primi o su una loro combinazione.

### 1.6.4 Dispositivi a slitta

#### 1.6.4.1 Dispositivo Double Concave Curved Surface Sliders (DCCSS)

La FIP Industriale S.P.A. ha progettato un nuovo isolatore a doppio pendolo opportunamente studiato per la protezione sismica delle statue museali, in particolare “I prigionieri” di Michelangelo esposti presso la Galleria dell’Accademia di Firenze (Berto, Favaretto e Saetta, 2013). Le superfici di scorrimento sono caratterizzate da uguale raggio e uguale coefficiente di attrito. Considerando le caratteristiche delle statue, il dispositivo è stato progettato per un carico verticale di 10 kN, e possiede le seguenti caratteristiche geometriche:  $h=75$  mm,  $\phi=270$  mm,  $D_{max}=160$  mm,  $R=1500$  mm (Baggio et al., 2013), dove  $h$  e  $\phi$  rappresentano l’altezza e il diametro dell’isolatore,  $D_{max}$  il massimo spostamento consentito e  $R$  il raggio di curvatura delle superfici (Figura 1.30a).



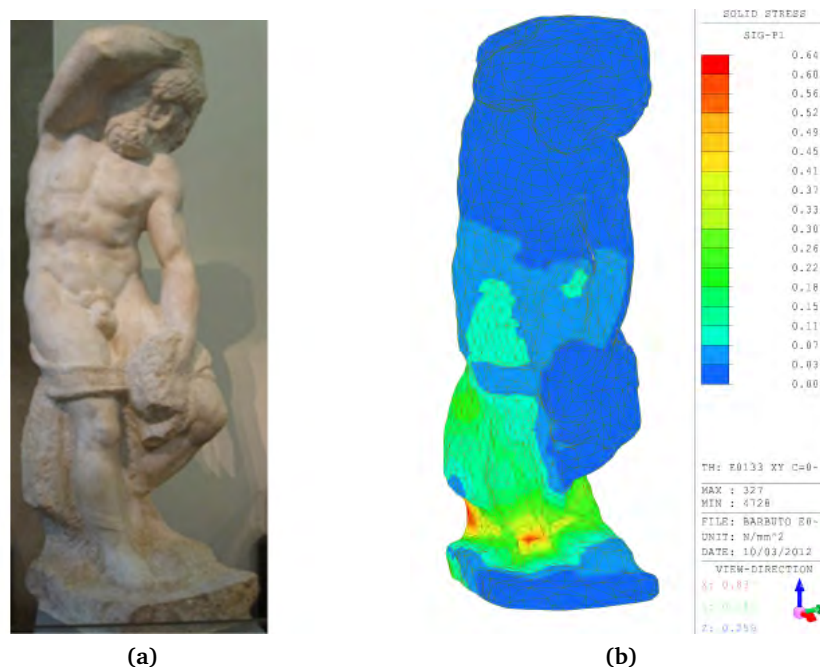
**Figura 1.30.** Dispositivo a doppio pendolo (a), e apparato sperimentale utilizzato nei test (b)

Nelle prove su tavola vibrante le statue sono state rappresentate con un insieme di parallelepipedi in calcestruzzo (*body block*) collegabili tra loro e ancorati con barre filettate ad un elemento di base chiamato *footing block* (Figura 1.30b).

Le forzanti applicate sono di tipo sinusoidale e caratterizzate da uguale spostamento, ma con diversa frequenza.

Successivamente, in base ai risultati ottenuti, sono stati tarati i parametri da usare nelle simulazioni numeriche. In Figura 1.31a è rappresentato uno dei Prigionieri esaminato (Berto,

Favaretto e Saetta, 2013), mentre in Figura 1.31b è evidenziato il modello numerico utilizzato, la *mesh*, e lo stato tensionale della scultura.



**Figura 1.31.** Prigione Barbuto (a), e tensioni presenti nella statua con modello FEM (b)

In termini di stato tensionale si sono riscontrate riduzioni dell'80% tra la statua isolata e quella non isolata sismicamente, dunque con una notevole efficacia del dispositivo. Inoltre le prove monodirezionali hanno sottolineato una significativa riduzione delle accelerazioni trasmesse alla struttura e hanno mostrato che l'efficacia del dispositivo aumenta al crescere dell'accelerazione del suolo.

Le curve isteretiche hanno mostrato oscillazioni locali nelle accelerazioni in *output*, che in alcuni casi inducono significative deviazioni dal comportamento teorico atteso. Questo fenomeno è probabilmente dovuto a uno spostamento non simultaneo dei blocchi tra loro, alle configurazioni geometriche, alla disposizione degli isolatori e alle loro caratteristiche geometriche e all'intensità dell'accelerazione in *input*.

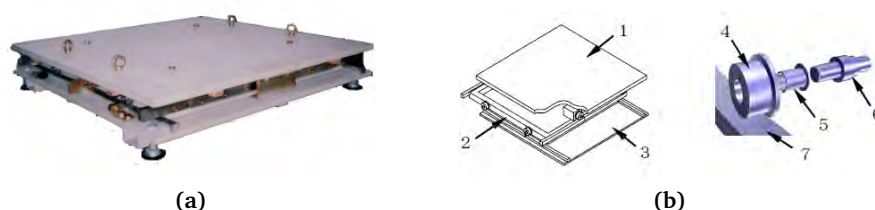
Si devono dunque segnalare alcuni fenomeni locali inattesi, così come gli effetti dell'azione verticale, che nel caso di oggetti d'arte possono risultare particolarmente critici, e dovranno essere oggetto di ulteriori approfondimenti.



### 1.6.4.2 Roller-Type Isolation Device

Il Giappone è lo stato dove l'isolamento sismico è più diffuso, sia per la protezione delle strutture civili che per l'equipaggiamento leggero e per le opere d'arte. A partire dal terremoto di Hanshin-Awaji del 1995, dove sono state danneggiate molte opere d'arte in vari musei della zona, si è data sempre più importanza all'isolamento di vetrine museali a singoli oggetti d'arte, così come a sistemi di *computers*.

E' stato studiato un dispositivo a rotolamento (Ueda, Enomoto e Fujita, 2004) costituito da due piani di rotaie articolate e perpendicolari tra loro (Figura 1.32a): ognuno di essi può muoversi in una delle due direzioni ortogonali del piano X e Y, garantendo dunque lo spostamento globale del dispositivo nel piano. Le rotaie presentano una forma rettilinea in pianta, ma circolare in sezione verticale, in modo da poter garantire una forza ricentrante che permette di rendere trascurabili gli spostamenti residui alla fine del sisma. La configurazione della rotaia, e del rullo, intesi come superfici che scorrono l'una sull'altra permettono di assimilare questo isolatore ai dispositivi a slitta.



**Figura 1.32.** Dispositivo Roller-Type (a) e relativo schema di funzionamento (b)

In Figura 1.32b sono illustrate le varie parti componenti il dispositivo: 1 indica il piatto superiore, 2 una rotaia, 3 il piatto di base, 4 una ruota, 5 la boccia di collegamento, 6 l'asse della ruota, 7 la superficie di scorrimento della rotaia. Le componenti da 4 a 7 sono rivestite di PTFE (*Polytetrafluoroethylene*).

Dato che il periodo naturale del sistema è indipendente dalla massa, si possono raggiungere periodi lunghi anche per strutture relativamente leggere, come le vetrine espositive.

L'isolatore in Figura 1.32a ha pianta quadrata di lato 900 mm ed un'altezza pari a 190 mm e 2.68 secondi come periodo naturale di vibrazione.

Per testare questo dispositivo sono stati eseguiti dei test tri-direzionali su tavola vibrante, imprimendo al sistema (isolatore più vetrina fissata al di sopra) le accelerazioni di alcuni terremoti storici (El Centro 1940, Taft 1952 e Kobe 1995).



(a)



(b)

**Figura 1.33.** Applicazione del dispositivo ai Borghesi di Calais di Auguste Rodin (a) e alle vetrine del Gifu Modern Museum (b)

Questo dispositivo ha già visto delle applicazioni museali in Giappone, infatti è stato inserito sotto al “Pensatore” e ai “Borghesi di Calais” (Figura 1.33a) di Auguste Rodin. Sono state isolate anche delle vetrine al Gifu Modern Museum (Figura 1.33b).

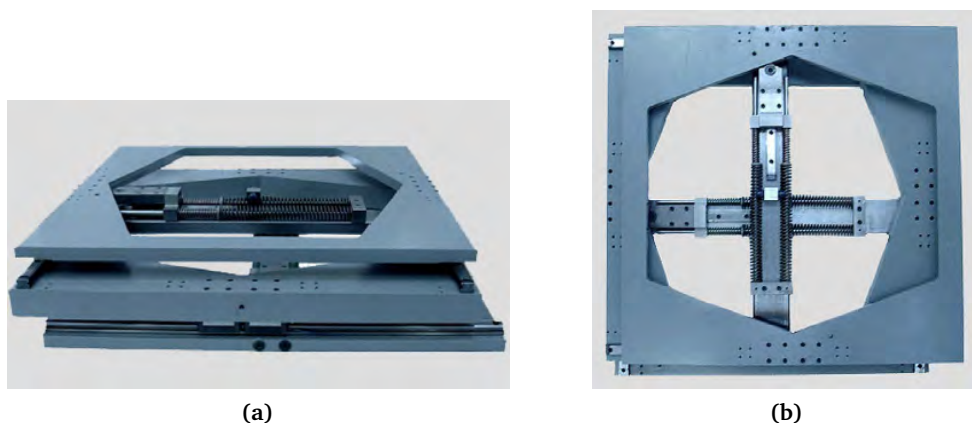
#### 1.6.4.3 Linear Rail Device

Il dispositivo di isolamento presenta un meccanismo disaccoppiante su tre livelli che permette il movimento relativo tra i tre strati in acciaio che lo costituiscono (Figure 1.34a e 1.34b). Lo strato superiore e quello centrale sono poggiati su sistemi di rotaie ortogonali che permettono spostamenti lungo le direzioni X e Y.

Tali spostamenti sono limitati dalla presenza di una guida montata in posizione centrale per ogni strato, la quale comprime una serie di molle che forniscono una certa rigidità orizzontale e generano la forza di ricentraggio che riporta in posizione il dispositivo alla fine del terremoto. Sono stati utilizzati due diversi set di molle in serie: le molle meno rigide entrano in funzione per forze orizzontali contenute, ma quando viene superata una



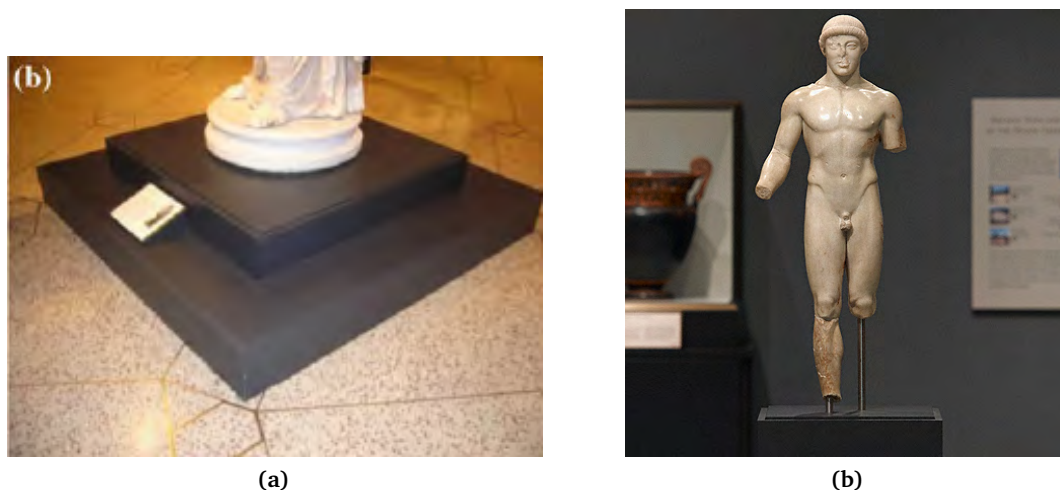
certa soglia entrano in gioco le molle più rigide, in modo da evitare il blocco improvviso del dispositivo al raggiungimento del massimo spostamento consentito.



**Figura 1.34.** Viste del Linear Rail Device utilizzato al Getty Villa Museum (Lowry et al., 2007)

Le forze che giungono all'isolatore da una direzione diagonale sono ripartite in X e Y attraverso un'azione di *scissoring* laterale permessa dal movimento relativo dei due strati superiori, inoltre tale configurazione evita l'insorgere di fenomeni torsionali.

Lo strato inferiore è fissato rigidamente al suolo, mentre lo strato superiore offre un piano di fissaggio per l'oggetto da isolare.



**Figura 1.35.** Applicazione del dispositivo *in situ* (a), e applicazione all'Agrigento Youth (<http://www.getty.edu>) (b)

Il movimento in direzione verticale è impedito da un sistema di blocchi meccanici che evita

qualsiasi spostamento, infatti esso mantiene le rotaie alla stessa quota altimetrica rispetto al suolo anche durante l'evento sismico.

Nel 1990 l'isolatore è stato testato con delle prove su tavola vibrante utilizzando il modello di un oggetto da esposizione riprodotto in scala reale, seguendo la distribuzione di masse originale. L'accelerazione misurata sulla sommità dell'oggetto, che era pari a 0.7 g nel test eseguito a base incastrata, si è ridotta a 0.3–0.4 g utilizzando il dispositivo di isolamento (riduzione del 70% a livello dell'isolatore e del 35–45% sulla sommità della statua).

L'isolatore è stato progettato per garantire uno spostamento massimo di 45.7 cm, il quale non sempre può essere consentito a causa dello spazio normalmente limitato presente nelle gallerie d'arte, e per la salvaguardia della sicurezza dei visitatori del museo che si trovano in prossimità dell'oggetto isolato.

Questo dispositivo è stato progettato appositamente per le opere d'arte esposte al Getty Villa Museum a Malibu (Figura 1.35a), e ha subito nel tempo numerose modifiche e miglioramenti successivi.

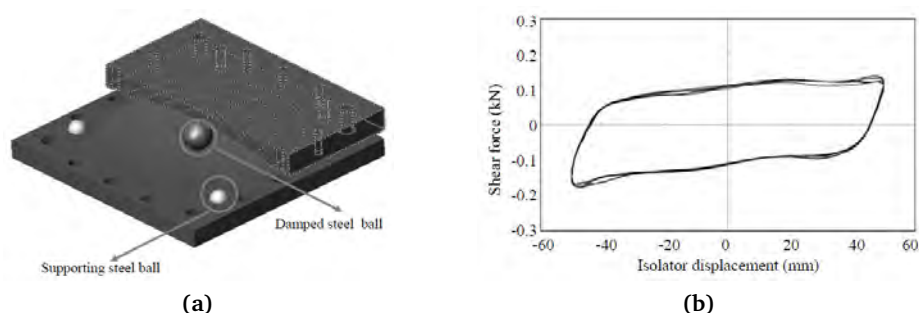
Una delle applicazioni più famose è l'isolamento della statua di un Kouros (the Agrigento Youth) come si può vedere in Figura 1.35b.

## 1.6.5 Dispositivi a rotolamento

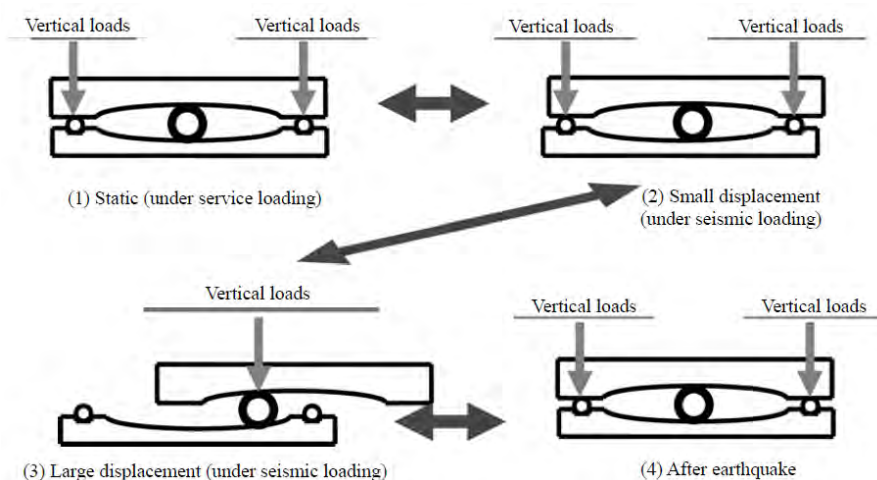
### 1.6.5.1 Static Dynamics Interchangeable - Ball Pendulum System (SDI-BPS)

Il dispositivo SDI-BPS (Figura 1.36a) consiste in due superfici concave in acciaio (non per forza a forma di calotta sferica), una superiore e una inferiore, alcune piccole sfere d'acciaio di supporto per i carichi verticali a lungo termine e per fornire lo smorzamento per attrito in caso di piccoli spostamenti. Al centro è posta una sfera d'acciaio circondata di materiale gommoso che fornisce smorzamento aggiuntivo in caso di grandi spostamenti (Figura 1.37).

Nel caso studiato (Tsai, 2012a) è stata utilizzata una sfera rotolante di 44.55 mm di diametro, ricoperta con uno spessore di 6.75 mm di gomma naturale, con durezza di 60 gradi nel IRHD (*International Rubber Hardness Degree*).



**Figura 1.36.** Dispositivo SDI-BPS in assonometria (a) e relativo ciclo isteretico (b)



**Figura 1.37.** Configurazione del dispositivo SDI-BPS, in condizioni di riposo (1,4), soggetto a carichi di servizio (2) e ad azioni sismiche (3)

In stato stazionario, la quasi totalità del carico verticale gravante sul dispositivo è sostenuta dalle piccole sfere in acciaio disposte lungo i bordi, mentre la frazione del carico supportata dalla sfera smorzata è trascurabile (Figura 1.37.1).

In caso di vibrazioni o di sismi, per i quali la forza orizzontale non supera l'attrito che si esercita tra le sferette e i punti di contatto, il comportamento del dispositivo è ancora governato dalle piccole sfere, le quali forniscono azione di supporto per i carichi verticali e attrito sufficiente per controllare quelli orizzontali, come nel caso precedente (Figura 1.37.2).

Quando la forza sismica orizzontale supera la forza di attrito, entra in gioco la sfera smorzata che comincia a rotolare tra le due superfici concave (Figura 1.37.3), avendo opportunamente configurato il loro raggio di curvatura in modo da ottenere il periodo naturale richiesto. In questo caso i tutti i carichi agenti vanno a gravare sulla sfera centrale, avendo

le sfere laterali perso il contatto con le due superfici. Lo smorzamento del sistema è fornito unicamente dalla deformazione del materiale di rivestimento della sfera.

Terminata l'azione sismica il dispositivo rotola in posizione originale senza mostrare spostamenti residui significanti (Figura 1.37.4), in quanto la componente della forza di gravità della struttura sovrastante, tangenziale alla superficie concava, fornisce la forza ricentrante.

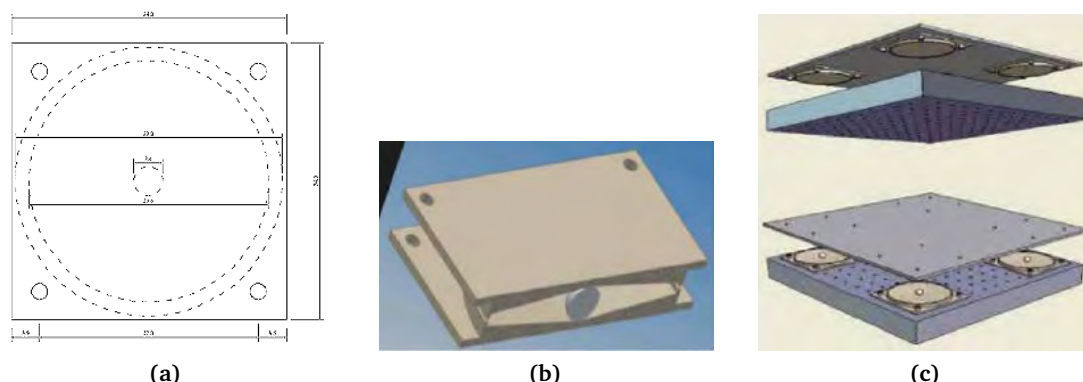
Dunque la sfera rivestita è soggetta a carichi temporanei indotti dal solo terremoto, e i carichi statici agenti vita natural durante non causano deformazioni permanenti al materiale gommoso, in quanto sono sostenuti dalle sfere d'acciaio poste ai lati.

Questo dispositivo ha permesso di superare i punti critici del dispositivo *BPS* precedente, che non prevedeva le sfere d'acciaio ai lati e il rivestimento della sfera centrale, ovvero: la formazione di tensioni troppo elevate dovute alla piccola area di contatto tra le superfici, i graffi e i danni alle due superfici concave.

#### 1.6.5.2 Ball In Cone Device (BNC)

Questo dispositivo è costituito da due superfici coniche in acciaio che racchiudono una sfera (sempre in acciaio) al loro interno (Figure 1.38a e 1.38b). Durante l'evento sismico la sfera può muoversi tra le due superfici, causando uno spostamento dell'oggetto da isolare posto sul dispositivo che genera delle forze laterali ricentranti direttamente proporzionali al peso della massa sovrastante (Kesti, Mowrtage e M. Erdik, 2010). Questo tipo di comportamento induce la coincidenza tra il centro di massa e il centro di rigidezza del sistema, e minimizza dunque gli effetti torsionali. Lo smorzamento del sistema è trascurabile, infatti i dispositivi BNC sono di solito impiegati in parallelo a dissipatori per ridurre lo spostamento orizzontale subito durante il sisma.

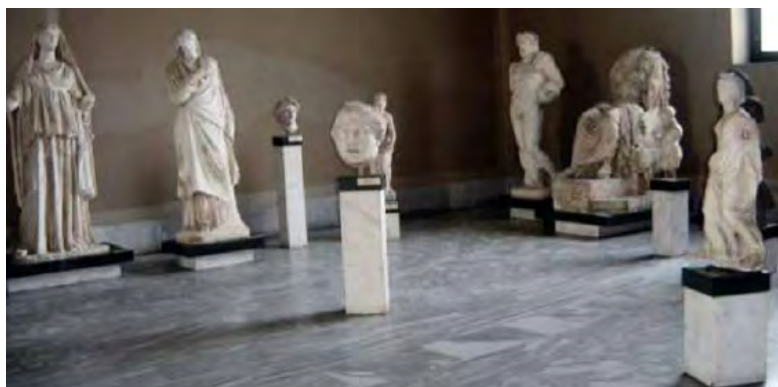
In Turchia sono stati attuati vari progetti supportati da UNESCO (1992-1994), World Bank ProVention (2003-2006), Ministero Turco della Cultura e del Turismo (2004). In particolare il progetto del 2006 sopracitato, che aveva come tema "*Protection of Museum Items Against*



**Figura 1.38.** Schema del dispositivo BNC (a), dispositivo in assonometria (b), e viste prospettiche della base isolata per vetrine con dispositivi BNC (c)

*Earthquake Shaking by Low-Cost Base-Isolation Devices*”, propose lo sviluppo del dispositivo “*Ball-in-Cone*” (BNC) per geometrie standardizzate e carichi tipici di oggetti museali.

Infatti la città di Istanbul negli ultimi 2000 anni ha subito terremoti di media intensità ogni 50 anni e terremoti di elevata intensità ogni 300 anni, dunque i musei della città incorrono in un grave rischio. I danni più recenti sono dovuti al terremoto di Kocaeli del 2009, con epicentro a 80 km dalla città.



**Figura 1.39.** Oggetti esposti presso l'Istanbul Archaeological Museums (M Erdik et al., 2009)

L'utilizzo di questo tipo di dispositivi si è rivelato essere molto adatto nel campo museale (M Erdik et al., 2009), permettendo una protezione sismica generalizzata degli oggetti d'arte ad un costo contenuto. Utilizzando isolatori BNC si può agire su differenti livelli di protezione, infatti può essere isolato un singolo oggetto d'arte, così come un'intera vetrina museale, disponendo adeguatamente i dispositivi BNC al di sotto della sua base (Figura 1.38c).

### 1.6.5.3 Rolling Pendulum Vibration Absorber (RPTMD)

Il dispositivo RPTMD (*Rolling Pendulum Tuned Mass Damper*), nella sua configurazione di base consiste in un sistema ad un grado di libertà che, collegato alla struttura da proteggere, fornisce una certa mitigazione nei confronti delle vibrazioni (Matta, De Stefano e Spencer, 2009).

Sintonizzando in modo appropriato la frequenza naturale del RPTMD in base a quella *target* della struttura sovrastante (generalmente corrispondente al suo primo modo di vibrare), parte dell'energia di vibrazione di quel modo viene trasferita al dispositivo e dissipata sfruttando il suo smorzamento.

L'efficienza di un dispositivo di questo tipo è strettamente connessa alla condizione di *tuning* e alla scelta dei parametri di controllo (frequenza e smorzamento).

Però se risulta necessario controllare la vibrazione delle strutture nelle due direzioni ortogonali principali, bisognerebbe usare due 2-D RPTMD (uno per ogni direzione) oppure usare un dispositivo orientato in una direzione e montato su un piatto vincolato ad un altro RPTMD orientato nell'altra direzione (aumentando dunque la complessità).

Un'alternativa è usare un innovativo 3-D RPTMD che rotola su una superficie tridimensionale non assialsimmetrica e che può essere sintonizzato direttamente sulle due frequenze strutturali fondamentali, anche se queste sono differenti. Questo è un problema di dinamica non-lineare non-olonomica di sfere che rotolano in cavità 3-D studiato in modo approfondito da Legeza, 2002.

In Figura 1.40a è rappresentato il prototipo del dispositivo usato per le prove sperimentali. In questo caso è stata scelta una superficie toroidale in quanto è più semplice da produrre da un blocco di materiale, usando seghe circolari rotanti. Sono state create cinque concavità toroidali identiche in due piatti di plexiglass di  $400 \times 300 \times 25 \text{ mm}^3$ . All'interno di tre dei cinque fori sono state posizionate sfere in acciaio di raggio 10 mm. Nel prototipo studiato, non essendo stati introdotti *dashpots* ausiliari, il contributo dissipativo è fornito dall'attrito che si genera tra le sfere e le superfici in plexiglass.

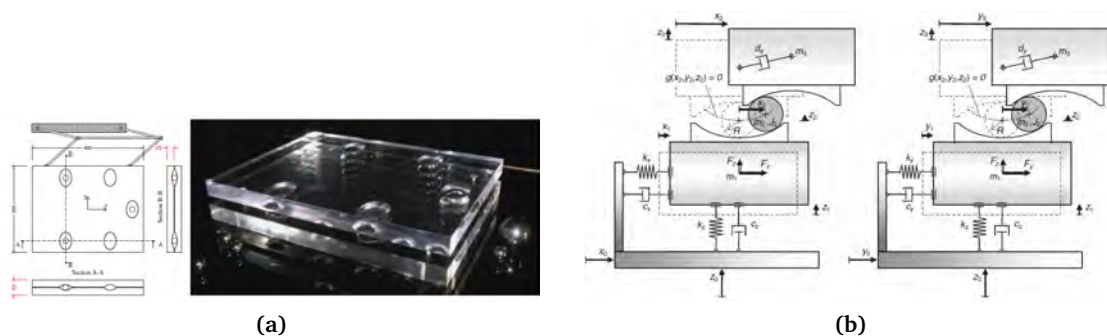


Figura 1.40. Dispositivo RPTMD (a), e relativo schema di funzionamento (b)

I test su tavola vibrante porgono risultati soddisfacenti, con l'avvertenza però di dover replicare l'esperienza su scala reale, in quanto gli *stress* concentrati possono produrre graffi e abrasioni alle superfici.

Questo dispositivo si rivela una vantaggiosa alternativa ai tradizionali isolatori 2-D in quanto permette, usando la stessa quantità di massa, il controllo simultaneo e in maniera specifica delle due direzioni ortogonali.

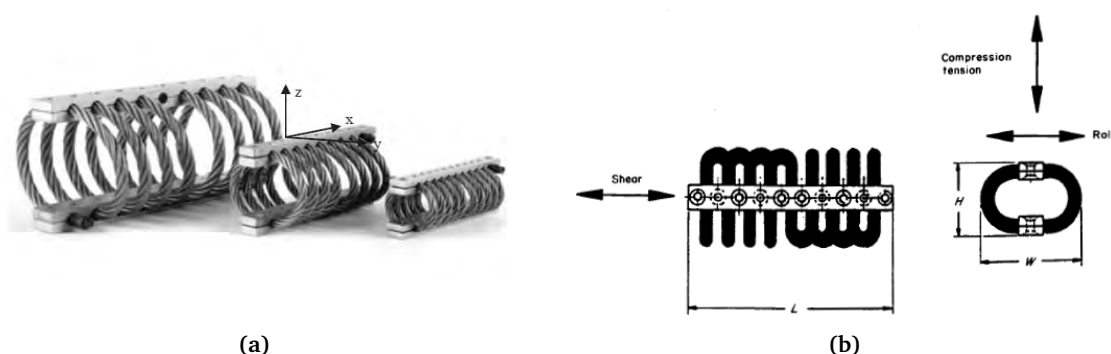
#### 1.6.5.4 Rolling Ball Rubber Layer (RBRL)

Questo dispositivo, argomento della tesi corrente, sarà trattato più dettagliatamente al capitolo 3 a pagina 77.

### 1.6.6 Altri dispositivi

#### 1.6.6.1 Wire-Rope – Steel Cable Dampers

Il dispositivo consiste in un cavo d'acciaio inossidabile intrecciato avvolto attorno a barre forate in lega di alluminio (Figure 1.41a e 1.41b), il quale può essere utilizzato per proteggere sismicamente strutture snelle che possono presentare problemi di *rocking* quando sono colpite da un terremoto.



**Figura 1.41.** Dispositivi Wire-Rope (a), e relativo schema di funzionamento (b)

il fenomeno di *rocking* genera azioni di trazione e compressione sui dispositivi *Wire-Rope*, e viene sfruttato per ridurre l'azione sismica che investe la struttura tramite un aumento del periodo naturale.

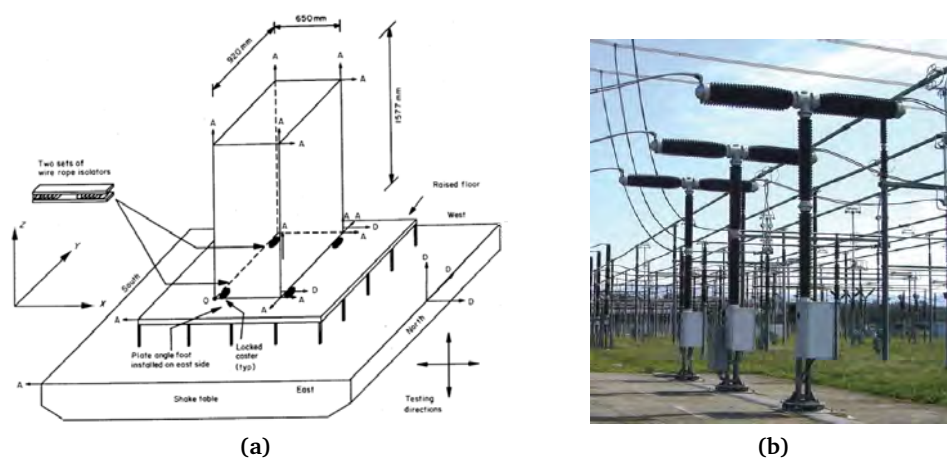
Inoltre, la sua flessibilità meccanica fornisce ottime proprietà di isolamento in tutte e tre le direzioni principali.

Esso è stato studiato sperimentalmente ed analiticamente (Figura 1.42a) da Demetriades, Constantinou e Reinhorn, 1993, e utilizzato per controllare le vibrazioni nella strumentazione *hardware* militare e nelle attrezzature industriali (Schwanen, 2004), ma il suo utilizzo nelle centrali elettriche risulta essere la prima applicazione pratica come sistema integrale di isolamento sismico (Alessandri et al., 2014).

Nelle centrali elettriche vi sono dei componenti che giocano un ruolo vitale nella stabilità del sistema di trasmissione dell'energia. Le esperienze raccolte dai recenti terremoti italiani (Emilia-Romagna 2012) hanno evidenziato che i *circuit breakers* (Figura 1.42b), sono molto vulnerabili al sisma e un loro malfunzionamento può inficiare l'affidabilità generale del sistema. La loro vulnerabilità sismica risiede nella loro forma slanciata con una grande massa concentrata in sommità e nella loro composizione ceramica.

La società italiana TERN in collaborazione con l'Università Roma Tre (Alessandri et al., 2014) ha proposto un nuovo sistema di isolamento di base per la protezione sismica di questi apparecchi contro terremoti di grande intensità utilizzando in un modo nuovo i dispositivi





**Figura 1.42.** Modello sperimentale per lo studio dei dispositivi Wire-Rope (a) (Demetriades, Constantinou e Reinhorn, 1993), e applicazione dei dispositivi in una centrale elettrica (b)

#### Wire-Rope.

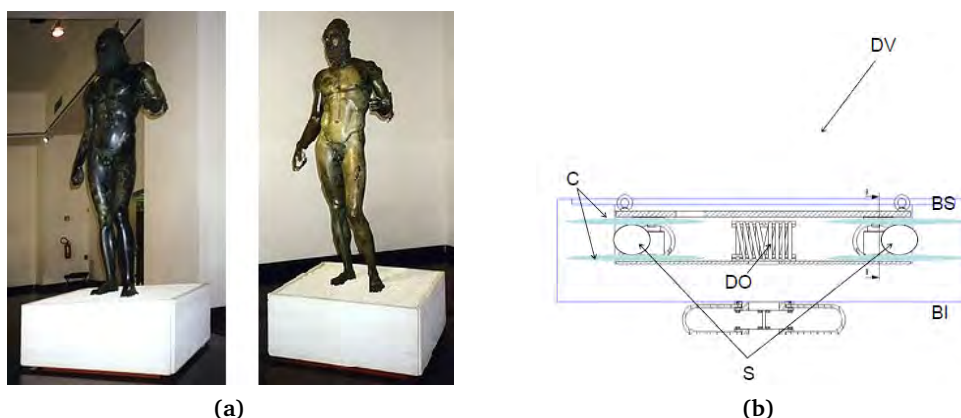
I dispositivi antisismici tradizionali non possono essere usati in questo caso, e queste strutture elettriche sono usualmente progettate o dimensionate per forze di taglio orizzontali e di compressione assiale, considerando solo la possibilità di una limitata variazione dello sforzo normale verticale e sempre in compressione. Strutture estremamente snelle come gli *HV circuit breakers* risultano quindi vulnerabili nel caso di azione sismica, soprattutto a causa del grande momento flettente agente alla base.

Le analisi condotte sull'efficacia del dispositivo utilizzando la teoria dell'elasticità lineare (ceramica e acciaio), dove i singoli elementi sono stati modellati a *beam* elastico lineari. I risultati provenienti dalla modellazione numerica sono stati validati attraverso una serie di prove su tavola vibrante. Sono state analizzate diverse configurazioni, variando il tipo e la disposizione degli isolatori. La scelta è un compromesso tra la necessità di ridurre le tensioni nella struttura e la limitazione degli spostamenti causati dal vento, i quali possono causare un movimento eccessivo dei cavi elettrici collegati.

#### 1.6.6.2 Rolling Double Pendulum Device: applicazione I Bronzi di Riace

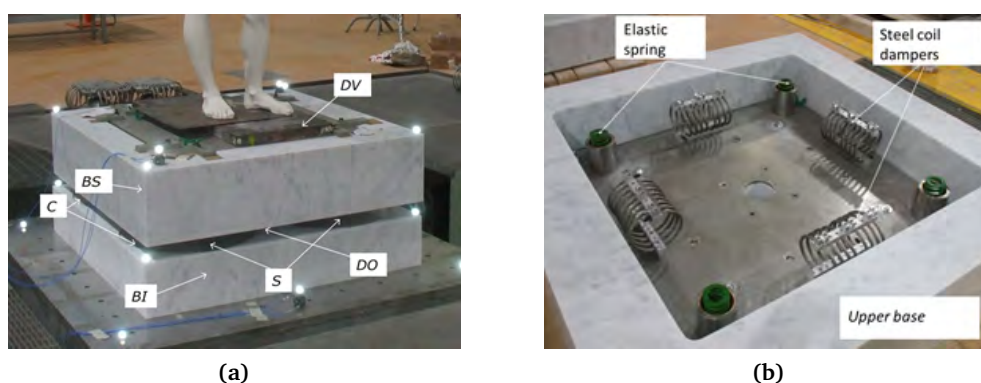
I Bronzi di Riace (Figura 1.43a), conservati presso il Museo nazionale della Magna Grecia di Reggio Calabria, sono statue molto importanti appartenenti al vasto patrimonio culturale

italiano. La necessità di preservarle da eventuali danni sismici ha portato allo studio, e alla successiva applicazione, di uno specifico dispositivo di isolamento non solo tecnicamente valido ma anche esteticamente ricercato (De Canio e Modena, n.d.).



**Figura 1.43.** Bronzi di Riace (Wikipedia) (a), schema di funzionamento del dispositivo (b)

In particolare, è stato realizzato un basamento in marmo, architettonicamente pregevole, prefiggendosi i seguenti obiettivi: consentire sufficienti spostamenti nel piano, tramite bassa rigidezza e bassa dissipazione, disaccoppiamento del moto orizzontale da quello verticale, reversibilità dell'intervento, massima compatibilità dei materiali e semplicità di manutenzione. La base può essere concepita come un sistema di isolamento passivo e “semi-passivo”: il primo fornisce un permanente isolamento passivo di base alla struttura, il secondo prevede isolatori bloccati in condizioni normali e sbloccati da un segnale SEW (*Seismic Early Wakening*).



**Figura 1.44.** Dispositivo di isolamento (a), vista della base superiore del dispositivo aperta (b)

I dispositivi *Rolling Double Pendulum* (Figura 1.43b, 1.44a, 1.44b), grazie ad un sistema

di appoggio su sfere in marmo, sono dotati di bassa rigidezza e smorzamento, forniti da cavi dissipativi (*Steel Coil Dampers*, vedi dispositivo *Wire Ropes*).

Le superfici dei blocchi marmorei sono modellate come ellissoidi di rivoluzione (per questo rigidità e frequenza principale del dispositivo non sono costanti ma variano tra 0.015 e 0.025 Hz), all'interno dei quali sono inserite quattro sfere dello stesso materiale. I due blocchi sono connessi da cavi in acciaio inossidabile per l'isolamento verticale. In breve il sistema è composto dai seguenti elementi: BI= blocco marmoreo inferiore, S= sfere di marmo, DO= dispositivo che riduce gli spostamenti orizzontali e ricentrante, DV= dispositivo di isolamento verticale inserito nel blocco marmoreo superiore e costituito da due piatti in acciaio inossidabile connessi da quattro *shock absorbers* formati da cavi dissipativi, affiancati a quattro molle inserite in delle guide a pistone che confinano e disaccoppiano il moto verticale da quello orizzontale.

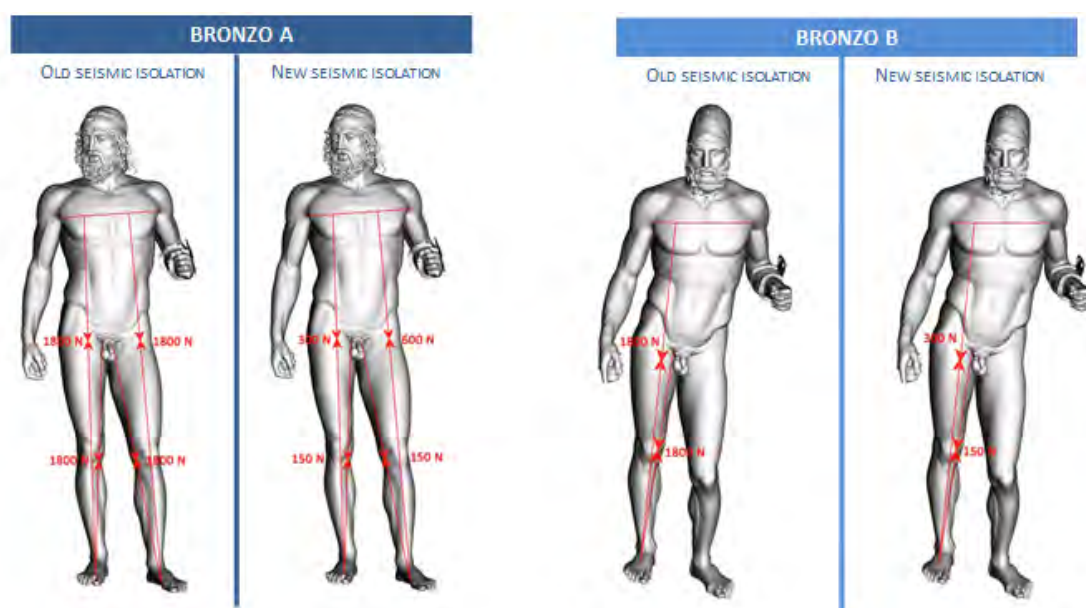


Figura 1.45. Forze agenti nei cavi pre e post-intervento

Dunque il dispositivo d'appoggio di base può essere diviso logicamente in tre parti: il blocco marmoreo, il sistema di ricentraggio e il dispositivo d'isolamento verticale.

I Bronzi di Riace erano precedentemente posti al piano terra del museo e provvisti di

isolatori elastomerici. Lo spostamento delle statue al piano superiore ha richiesto l'*upgrade* dei dispositivi, anche alla luce della nuova classificazione sismica del territorio.

I dispositivi precedenti prevedevano ancoraggi con cavi passanti attraverso le gambe delle statue e messi in tensione con forze di 1800 N per gamba, per evitarne il ribaltamento. Il nuovo dispositivo ha consentito anche ridurre le forze imposte alla statua attraverso i cavi a 600 N e 300 N come si può notare in Figura 1.45. Questi valori non sono casuali ma sono equivalenti alle forze trasmesse alla struttura dalle parti che sono andate perse (per esempio uno scudo sul braccio sinistro e una lancia sul braccio destro), riportando dunque lo stato tensionale della statua alla condizione originaria.



---

## CAPITOLO 2

### COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GOMME

---

Tradizionalmente la gomma è considerata un materiale di tipo viscoelastico, questo significa che il suo comportamento può essere rappresentato da un certo numero (preferibilmente infinito) di molle e smorzatori tra loro interconnessi, dotati di opportuni valori di rigidità e smorzamento costanti. In questi paragrafi si cercherà di presentare sinteticamente i concetti di base utilizzati poi nell'elaborazione dei dati raccolti nelle varie sperimentazioni effettuate sul dispositivo RBRL.

#### 2.1 Viscoelasticità

La viscoelasticità è la proprietà dei materiali che mostrano un comportamento nel tempo di tipo intermedio tra i materiali “puramente viscosi” e i materiali “puramente elastici”. Nel caso di materiali viscoelastici, la viscosità, intesa come costante di proporzionalità tra sforzo e velocità di deformazione, dipende dalla velocità di deformazione, dunque è un parametro reologico.

I materiali puramente elastici non dissipano energia quando è loro applicato e successivamente rimosso un carico, al contrario di un materiale viscoelastico, dove si osservano cicli di isteresi nel diagramma sforzo-deformazione, e dove l'area del ciclo equivale all'energia dissipata durante il test.

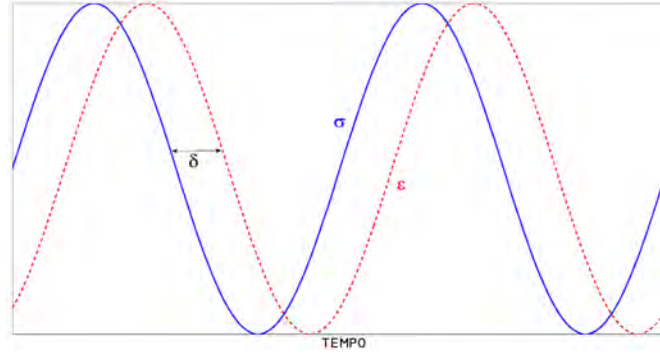
A livello microscopico, la viscoelasticità si spiega come un riarrangiamento molecolare. Quando si applica una certa tensione ad un materiale viscoelastico come un polimero, parte delle lunghe catene polimeriche cambia posizione (*creep*), disponendosi in modo da accompagnare la tensione imposta e, mano a mano che si sviluppa questo fenomeno, si genera una tensione di richiamo (*back stress*) nel materiale. Quando il *back stress* raggiunge la stessa entità della forza agente, il materiale interrompe il suo processo deformativo. Una volta rimossa la tensione agente sul materiale, la forza di richiamo accumulata nel tempo induce il polimero deformato a ritornare alla sua forma originale.

La viscoelasticità viene studiata mediante l'analisi meccanica dinamica (DMA), applicando una piccola deformazione oscillatoria al provino e misurandone la tensione risultante. A seconda della natura del materiale si possono distinguere i casi seguenti:

- materiali puramente elastici presentano sforzo e deformazione in fase, dunque la risposta al cambiamento di uno di questi parametri influenza in maniera immediata l'altro parametro;
- materiali puramente viscosi presentano la deformazione ritardata rispetto allo sforzo di  $90^\circ$ ;
- materiali viscoelastici mostrano un comportamento intermedio tra quello puramente elastico e quello puramente viscoso, presentando un ritardo della deformazione rispetto allo sforzo fra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (Figura 2.1).

### 2.1.1 Proprietà dinamiche della gomma

Quando alla gomma è imposta una deformazione costante, lo stress rilassa in funzione del tempo. Il rapporto tra tensione e deformazione (costante) è chiamato modulo di rilassamento, chiamato  $G(t)$  nel caso del taglio. Si può dunque utilizzare il parametro  $G(t)$  (*relaxation shear modulus*) per rappresentare le relazioni tra sforzo e deformazione in una prova dinamica; esso può essere determinato mediante una prova a rilassamento.  $G(t)$  è definito dalla risposta in



**Figura 2.1.** Sfasamento tra sforzo e deformazione in un materiale viscoelastico

termini di tensioni ad una deformazione iniziale costante  $\gamma_0$  (in questo caso la deformazione è mantenuta costante per tutta la durata della prova) all'istante  $t$  come:

$$G(t) = \sigma(t)/\gamma_0$$

Il materiale può essere anche sottoposto ad uno sforzo di tipo sinusoidale nel tempo. Anche attraverso questo tipo di prova si può caratterizzare il comportamento dinamico del materiale. Si calcola a questo punto il modulo complesso  $G^*(\omega)$ , funzione della frequenza di forzamento, il quale contiene informazioni sia sulla rigidità del materiale, sia sull'energia dissipata dallo scorrimento delle catene polimeriche:

$$G^*(\omega) = \frac{\sigma(t)}{\gamma(t)} = G'(\omega) + iG''(\omega)$$

dove:

$G'(\omega)$  rappresenta il contributo elastico (*dynamic storage shear modulus*), pari a  $G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta$ ;

$G''(\omega)$  rappresenta il contributo viscoso (*dynamic loss shear modulus*), pari a:  $G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta$ ;

$i$  è l'unità immaginaria, il cui quadrato vale -1 ( $i^2 = -1$ );

$\sigma_0$  è l'ampiezza dello stress;

$\gamma_0$  è l'ampiezza della deformazione;



$\delta$  rappresenta lo sfasamento (*phase shift*) tra tensione e deformazione.

$G'(\omega)$ ,  $G''(\omega)$  e il *loss factor* ( $\tan \delta = G''/G'$ ) sono note come “proprietà dinamiche” della gomma, nel senso che sono connesse alla risposta della gomma a deformazioni cicliche. La caratterizzazione completa del materiale presuppone la conoscenza, per l'intero range di frequenze, di uno solo di questi parametri.

Si può pensare di scomporre secondo due contributi il modulo di rilassamento totale  $G(t) = G_\infty + \tilde{G}(t)$ , avendo indicato con  $G_\infty$  il valore di  $G(t)$  a tempo infinito, senza nulla togliere al significato della grandezza.

Le definizioni rigorose dei parametri, che legano tra loro il modulo di rilassamento e modulo complesso  $G'(\omega)$ ,  $G''(\omega)$  si possono esprimere come:

$$G'(\omega) = G_\infty + \omega \int_0^\infty (G(t) - G_\infty) \sin \omega t \, dt$$

$$G''(\omega) = \omega \int_0^\infty (G(t) - G_\infty) \cos \omega t \, dt$$

Dunque, a livello teorico, le informazioni fornite dal modulo di rilassamento  $G(t)$  e dal modulo complesso  $G^*(\omega)$  risultano essere equivalenti.

Un'utile approssimazione del primo ordine porge la seguente equazione:

$$G''(\omega) \approx \frac{\pi}{2} \frac{dG'(\omega)}{d \ln(\omega)} \approx -\frac{\pi}{2} \frac{dG(t)}{d \ln(t)} \Big|_{t=1/\omega}$$

In queste equazioni,  $G'$  e  $G''$  sono definiti dalla risposta sinusoidale in termini di tensione  $\sigma(t)$  ad una deformazione tagliante imposta di tipo sinusoidale  $\gamma(t)$ , dove:

$$\begin{aligned}
\gamma(t) &= \gamma_0 \sin(\omega t) \\
\sigma(t) &= \gamma_0 [G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t] \\
&= \gamma_0 |G^*(\omega)| \sin(\omega t + \delta)
\end{aligned}$$

avendo indicato con  $\tilde{\gamma}$  l'ampiezza di deformazione,  $|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2}$  e  $\tan \delta = G''/G'$ . Il *loss factor* rappresenta il rapporto tra l'energia dissipata e l'energia immagazzinata nel sistema per ogni ciclo, ed è utilizzato per quantificare il livello di smorzamento isteretico in un materiale.

Quando la funzione che descrive l'andamento degli sforzi o delle deformazioni nel tempo è un'equazione differenziale ordinaria, separabile nei confronti della risposta allo scorrimento viscoso sia del carico applicato, si parla di *viscoelasticità lineare*. Tutti i modelli viscoelastici lineari possono essere rappresentati dall'equazione di Volterra, in accordo col principio di convoluzione di Boltzmann (Mühr, 2005):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{inst,creep}} + \int_0^t K(t-t') \dot{\sigma}(t') dt'$$

oppure:

$$\sigma(t) = E_{inst,relax} \varepsilon(t) + \int_0^t F(t-t') \dot{\varepsilon}(t') dt'$$

dove  $E_{inst,creep}$  è il modulo elastico istantaneo misurato nella prova di scorrimento viscoso,  $E_{inst,relax}$  è il modulo elastico istantaneo misurato nella prova di rilassamento degli sforzi,  $K(t)$  è la funzione di scorrimento viscoso e  $F(t)$  è la funzione di rilassamento degli sforzi.

La viscoelasticità lineare è applicabile solo nel caso di piccole deformazioni. Quando la funzione non è più separabile, ovvero se si ragiona per grandi deformazioni o se il materiale cambia le sue proprietà durante la deformazione, si parla di *viscoelasticità non lineare*.

### 2.1.2 L'integrale di Boltzman

Come si è visto ai paragrafi precedenti, la viscoelasticità lineare può essere considerata in termini meccanici come una combinazione lineare di molle hookeane e smorzatori. Questi modelli generalmente generano leggi costitutive che sono equazioni differenziali ordinarie. In ogni caso può essere usato anche un approccio di tipo integrale per risolvere il problema. Gli integrali sono operazioni di somma, e nell'ottica della viscoelasticità lineare si stabilisce che la risposta del materiale calcolata al tempo  $t$  sia la somma delle risposte alle eccitazioni imposte in tutti gli istanti precedenti. Dunque deve essere valido il principio di *sovrapposizione degli effetti*.

Matematicamente, se la tensione dovuta ad una deformazione  $\varepsilon_1(t)$  è pari a  $\sigma(\varepsilon_1)$  e quella dovuta ad una diversa deformazione  $\varepsilon_2(t)$  vale  $\sigma(\varepsilon_2)$ , dunque la tensione dovuta ad entrambe le deformazioni vale  $\sigma(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = \sigma(\varepsilon_1) + \sigma(\varepsilon_2)$ .

Considerando adesso, invece di due deformazioni, una serie di deformazioni successive infinitesime applicate da 0 a  $t$ , si può allora scrivere il cosiddetto integrale di Boltzman:

$$\sigma(t) = E_{ist} \varepsilon(t) + \int_0^t F(t - \tau) \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau$$

dove  $F$  è la funzione di rilassamento degli sforzi. Questa espressione è una forma dell'integrale di Duhamel, dove  $F$  può essere interpretata come la tensione  $\sigma(t)$  risultante da una deformazione unitaria. Se invece è la tensione la variabile di input si può scrivere:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)/E_{ist} + \int_0^t C(t - \tau) \dot{\sigma}(\tau) d\tau$$

dove  $C$  è la funzione di viscosità, definita come la risposta in termini di deformazione ad uno stress unitario imposto.

### 2.1.3 La serie di Prony

In un test di rilassamento unidimensionale, il materiale è soggetto a una deformazione istantanea, che viene mantenuta costante per tutta la durata della prova, mentre lo stress viene misurato nel tempo. La tensione iniziale, dovuta alla risposta elastica del materiale, decresce nel tempo per effetto della componente viscosa. Per descrivere l'andamento del modulo di rilassamento nel caso del taglio  $G(t)$ , o di un altro parametro considerato nei test, si può utilizzare la serie di Prony (Ahmadi, Muhr e Kingston, 2005):

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N G_i \exp(-t/\tau_i)$$

dove  $G_{\infty}$  rappresenta il valore di  $G(t)$  a tempo infinito, una volta che il materiale è totalmente rilassato, e  $\tau_i$  rappresenta il tempo di rilassamento per il contributo  $G_i$ .

Notando che il modulo elastico istantaneo è legato a quello di lungo termine dalla relazione

$$G(t=0) = G_0 = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N G_i$$

si può dunque esprimere  $G(t)$  come:

$$G(t) = G_0 - \sum_{i=1}^N G_i [1 - \exp(-t/\tau_i)]$$

Questa forma risulta essere conveniente nel caso in cui il valore  $G_0$  sia ottenuto da dati non provenienti da un test di rilassamento.

### 2.1.4 Modello di Kelvin-Voigt

I materiali viscoelastici possono essere modellati, per esprimere il comportamento elastico e quello viscoso, attraverso una combinazione lineare di elementi *spring* e *dashpot*. Ogni modello è differente per il diverso arrangiamento di questi elementi.

La risposta elastica può essere modellata mediante l'impiego di molle hookeane di costante elastica  $E$ , secondo la classica relazione  $\sigma = E\varepsilon$ ; invece le componenti viscosi possono essere tenute in considerazione mediante l'introduzione di smorzatori newtoniani dotati di viscosità  $\eta$ , dove l'equazione che li governa è invece la seguente:  $\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$ .

Il modello Kelvin-Voigt (Fig.2.2) è il sistema più semplice, tra quelli che combinano molle hookeane e smorzatori newtoniani per spiegare il comportamento dei polimeri ed è facilmente implementabile numericamente. Esso è composto da un dissipatore viscoso collegato in parallelo ad una molla, e l'equazione costitutiva ad esso associata è la seguente:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

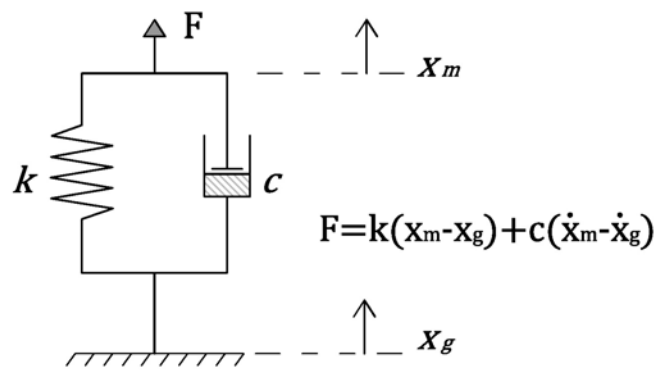


Figura 2.2. Modello di Kelvin-Voigt

## 2.2 Metodi di linearizzazione

Le gomme normalmente contengono un *filler* necessario per aumentarne le caratteristiche meccaniche che porta però ad un comportamento non-lineare del materiale, perciò i cicli di isteresi non saranno delle ellissi perfette e la loro inclinazione mostrerà una marcata dipendenza dall'ampiezza. Tuttavia, in condizioni stazionarie, l'utilizzo della teoria viscoelastica lineare si considera adeguato (Ahmadi e Muhr, 1997).

Dunque, per una data ampiezza e frequenza, l'isolatore elastomerico può essere caratterizzato attraverso un modello Kelvin calibrato utilizzando i parametri viscoelastici lineari  $K'$  (*storage stiffness*) e  $K''$  (*loss stiffness*), analoghe a  $G'$  e  $G''$ :

$$\begin{cases} c \equiv K''/\omega \\ k \equiv K' \end{cases}$$

dunque ottengo

$$\tan \delta = K''/K' = c\omega/k$$

e il coefficiente di smorzamento

$$\xi = c/(2\sqrt{mk}) = 0.5(\sqrt{K'/m\omega}) \tan \delta$$

avendo con  $m$  indicato la massa.

I valori dei parametri  $c$  e  $k$  devono essere modificati se variano l'ampiezza e la frequenza, dato che  $K'$  e  $K''$  sono funzioni di queste variabili. Non esiste un solo modo per definire i parametri equivalenti linearizzati (per esempio  $|G^*|$  e  $\delta$ ), in questo caso è stato utilizzato il *metodo armonico*.

Questo metodo consiste nel calcolare le componenti di Fourier della risposta periodica  $\tau$  secondo la frequenza fondamentale  $\omega$ :

$$\tau(t) = \tilde{\tau}_1 \sin(\omega t + \delta_1) + \tilde{\tau}_2 \sin(\omega t + \delta_2) + \dots$$

Solo le prime componenti armoniche sono mantenute nel modello linearizzato dunque:

$$|G^*| = \tilde{\tau}_1/\tilde{\gamma}$$

Per calcolare  $\tilde{\tau}_1$  e  $|G^*|$  si utilizzano le seguenti equazioni di Fourier:

$$\begin{cases} \tilde{\tau}_1 \cos \delta_1 = \frac{\omega}{\pi} \int \tau(t) \sin(\omega t) dt \\ \tilde{\tau}_1 \sin \delta_1 = \frac{\omega}{\pi} \int \tau(t) \cos(\omega t) dt \end{cases}$$

le quali devono essere risolte mediante integrazione numerica.

---

## CAPITOLO 3

### ROLLING–BALL RUBBER–LAYER (RBRL)

---

#### 3.1 Storia e descrizione del dispositivo

Il dispositivo RBRL è abbastanza recente in confronto agli altri apparecchi di isolamento ed è stato inizialmente proposto dal Prof. A.G. Thomas e sviluppato al TARRC<sup>1</sup>. E' adatto all'isolamento di strutture leggere (massa minore di 10 tonnellate) nella sua forma più semplice è dotato essenzialmente di tre componenti:

- ◇ Sfere in acciaio;
- ◇ Piastre d'acciaio con una delle superfici rivestita in gomma;
- ◇ Dispositivi di ricentraggio (molle in gomma).

Nelle Figure 3.1 e 3.2 è illustrato lo schema del dispositivo:

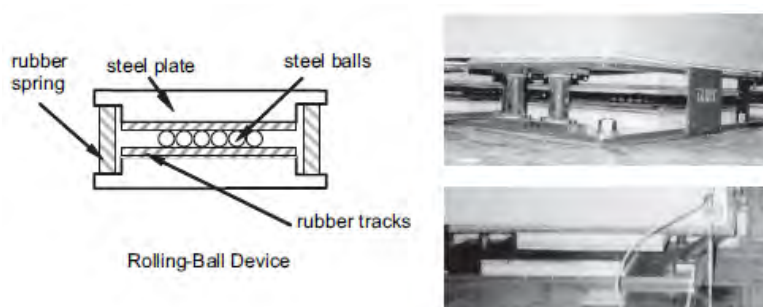
Per eccitazioni sismiche di entità rilevante è stato dimostrato (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007) che il dispositivo RBRL presenta un'efficace risposta, come ci si può aspettare da un sistema di isolamento dove si possono scegliere il periodo di vibrazione ed il rapporto di smorzamento caso per caso.

Il dispositivo risulta essere molto efficiente nel ridurre gli effetti del terremoto anche per sismi di entità più lieve (Donà et al., 2014) per un elevato range di frequenze, nonostante

---

<sup>1</sup>Tun Abdul Razak Research Centre





**Figura 3.1.** Dispositivo RBRL, sezione trasversale (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007)

esso presenti maggiore rigidità per spostamenti dell'isolatore inferiori ai 5 mm. Il principale responsabile di questa efficacia nelle piccole vibrazioni è l'elevato valore del coefficiente di smorzamento, in sinergia con la modifica della forma modale dovuta alla cedevolezza dell'isolatore. Da qui l'efficacia rispetto ai classici isolatori a slitta, dove un'eccitazione sismica non sufficiente all'innescio del movimento dell'isolatore porterebbe ad un comportamento a base incastrata, con i conseguenti possibili danni alla struttura da proteggere.

Questo dispositivo è stato oggetto di un'estesa campagna di studi sperimentali sviluppati al TARRC e in collaborazione con altri centri di ricerca (si veda Tabella 3.1).

Project / Publication	Type of tests	Tracks	Springs	Superstructure
INCLUDING SHAKING TABLE TESTS				
EERC (Foti and Kelly, 1996)	monoaxial	high damping, Jakarta compound (Lab Rep 96. Compound 009-06)	steel coil, soft	flexible - model building
ENEL/ISMES/TARRC collaboration (Muhr and Bergamo, 2010)	monoaxial	high damping, probably the same of EERC	steel coil, soft	rigid - concrete slab
REEDS (Bettinali et al., 2001)	triaxial	low damping A, inside $\phi$ of 190 mm, high damping B outside (ball array $\phi \sim 190$ mm)	rubber B, stiff (1.3Hz)	flexible - electrical substation structure
ECOEST (Guerreiro et al., 2007)	monoaxial, biaxial and triaxial	low damping A, both or upper, high damping B, lower	rubber A, soft and none	rigid or flexible model building
LABORATORY BASED STUDIES				
DEGREE PROJECT (Cook et al., 1997)	monoaxial	unfilled NBR	none	none
PhD PROJECT (Muhr et al., 1997)	monoaxial	unfilled NR (two levels of curatives) and NBR	none	None

**Tabella 3.1.** Sommario degli studi eseguiti dal TARRC e altri centri di ricerca (Donà et al., 2014)

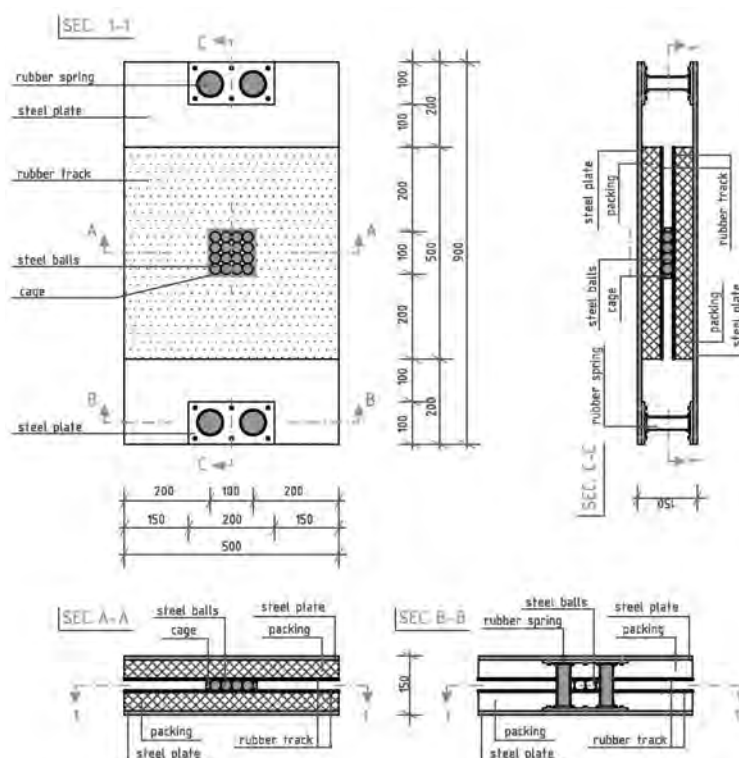


Figura 3.2. Dispositivo RBRL, pianta e sezioni (Donà et al., 2014)

## 3.2 Componenti e materiali

Di seguito si riporta un elenco dei principali componenti che compongono il dispositivo, accompagnato dalla descrizione di ogni singolo elemento.

### 3.2.1 Sfere d'acciaio

Le sfere d'acciaio, interposte tra le piastre di acciaio (alle quali è stato solidarizzato uno strato in gomma mediante vulcanizzazione), svolgono due funzioni fondamentali: supporto per i carichi gravitazionali, riduzione della rigidità orizzontale del sistema. Esse possono essere rivestite di un film polimerico per garantire maggiore smorzamento, proteggere l'acciaio da fenomeni corrosivi e minimizzare la tendenza delle sfere ad aderire alla gomma dopo un tempo di contatto prolungato.

Numero e diametro delle sfere variano in relazione al peso del carico sostenuto e allo spessore dello strato di gomma con il quale sono a contatto.

### **3.2.2 Cuscinetti di gomma**

Gli strati di gomma forniscono un certo livello di smorzamento, essenziale per poter contenere le traslazioni orizzontali della struttura. Il fenomeno della dissipazione è strettamente legato alla presenza dei cuscinetti di gomma sui quali si muovono le sfere in acciaio. In questi isolatori viene normalmente impiegata gomma naturale soffice ad alto smorzamento, la quale è stata caratterizzata sperimentalmente al TARCC. Le proprietà viscoelastiche della gomma sono quelle che interessano maggiormente in quanto influenzano notevolmente la dissipazione energetica.

### **3.2.3 Il sistema di ricentraggio**

Questo sistema è costituito da molle in gomma (o in acciaio) necessarie per annullare o limitare al minimo gli spostamenti residui in seguito ad un evento sismico. Tali elementi forniscono la cosiddetta forza di richiamo, strettamente connessa alla rigidità del sistema.

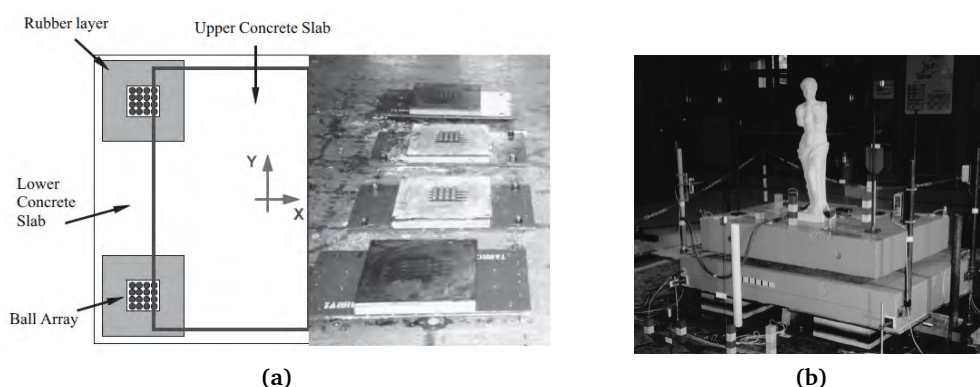
Le caratteristiche (rigidità, carico massimo, spostamento massimo) delle molle in acciaio di tipo elicoidale (disposte in senso orizzontale) sono direttamente fornite dal produttore dunque non hanno bisogno di essere testate. Il discorso è diverso per molle di tipo elastomerico (disposte in senso verticale), in quanto le caratteristiche di rigidità e smorzamento variano notevolmente al variare delle proprietà della gomma di cui sono composte.

## **3.3 Vantaggi del dispositivo RBRL**

Per le strutture leggere l'uso di isolatori laminati in gomma non è tecnicamente consigliato. I requisiti che deve soddisfare il dispositivo sono:

- bassa rigidezza alla traslazione orizzontale: per avere questa bassa rigidezza servirebbero dei dispositivi molto piccoli che andrebbero incontro a problemi di instabilità per i carichi verticali gravanti su di essi;
- sopportare in modo sicuro i carichi verticali anche per grandi spostamenti;
- proteggere la struttura anche per terremoti inferiori a quello di progetto, per problemi che si incontrano anche per valori di accelerazione minori (*rocking*): in questo caso per esempio, i dispositivi a slitta richiederebbero dei raggi di curvatura troppo elevati, e avrebbero problemi di innesco (vincere la forza di attrito radente) per sismi di entità inferiore rispetto a quella di progetto.

Sono stati eseguiti vari test (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007) con differenti configurazioni di masse (Figure 3.3a e 3.3b) per questo dispositivo che si è dimostrato molto efficiente nel ridurre gli effetti dell'azione sismica. La sua natura modulare permette un totale *design* dei parametri di rigidezza, spostamento, e capacità portante, modificando la geometria e i materiali dei singoli componenti.



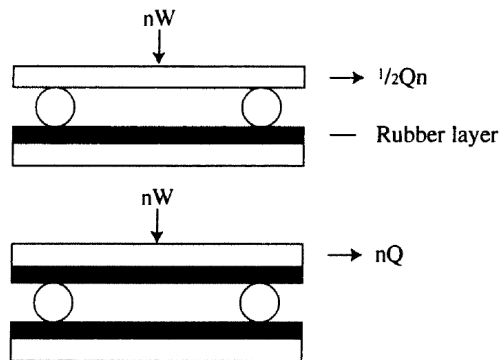
**Figura 3.3.** Posizionamento dei dispositivi RBRL (a), e configurazione sperimentale (b) (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007)

L'unico caso in cui si è dimostrato inefficace riguarda terremoti nei quali è prevalente il contenuto di basse frequenze ( $\leq 0.5Hz$ ), ma questa è una limitazione comune anche agli altri sistemi di isolamento esistenti. In tutti gli altri casi questo dispositivo è stato in grado di ridurre l'accelerazione di almeno 2.5 volte.

Il grande vantaggio del dispositivo *RBRL* è la capacità di mantenere un alto livello di smorzamento (dell'ordine del 30% di quello critico) anche per scosse molto piccole, di gran lunga inferiori al sisma di progetto.

### 3.4 Teoria alla base del dispositivo

Si definisce la forza di attrito  $Q$ , come il lavoro svolto quando la sfera di acciaio rotola per una distanza unitaria su un tappeto di gomma viscoelastico (Cook et al., 1997). Il lavoro di *indentation*  $U$  viene applicato e recuperato  $1/2a$  volte per unità di distanza, dove  $a$  rappresenta il raggio di contatto della sfera. Assumendo che una frazione  $\alpha$  dell'*indentation* si perda per ogni ciclo si ottiene  $Q \approx \alpha U/2a$ .



**Figura 3.4.** Possibili disposizioni delle sfere e degli strati di gomma per la determinazione sperimentale della resistenza al rotolamento;  $n$  rappresenta il numero di sfere per strato

Il parametro  $\alpha$  secondo il primo articolo di Muhr veniva assunto pari a  $\pi \sin \delta$ , dove  $\delta$  rappresenta il cosiddetto *loss angle* ottenuto da esperimenti di taglio dinamico ad appropriata ampiezza e frequenza. Questa legge è stata poi modificata e calibrata attraverso una serie di prove sinusoidali monoassiali su gomme di vario tipo (Donà, 2015) ottenendo una nuova relazione:

$$\alpha = \pi \sin \delta \cdot g(W/ER^2)$$

avendo indicato con  $g$  una funzione ( $g(W^*) = aW^{*2} + bW^* + c$ ) che dipende dalla quantità  $\frac{W}{ER^2}$  chiamata convenzionalmente parametro di stress ( $W^*$ ) e da altri tre coefficienti stimati empiricamente a seconda della tipologia di gomma utilizzata. Il parametro di stress  $W^*$  dipende da  $R$ , che rappresenta il raggio delle sfere in acciaio dal modulo elastico della gomma  $E$ , e serve per dare un'indicazione del livello di tensione concentrata che agisce sulla gomma sulla porzione di contatto con la sfera.

Il coefficiente di attrito  $\mu$  è dato da:

$$\mu = Q/W \approx \alpha \frac{U}{2aW}$$

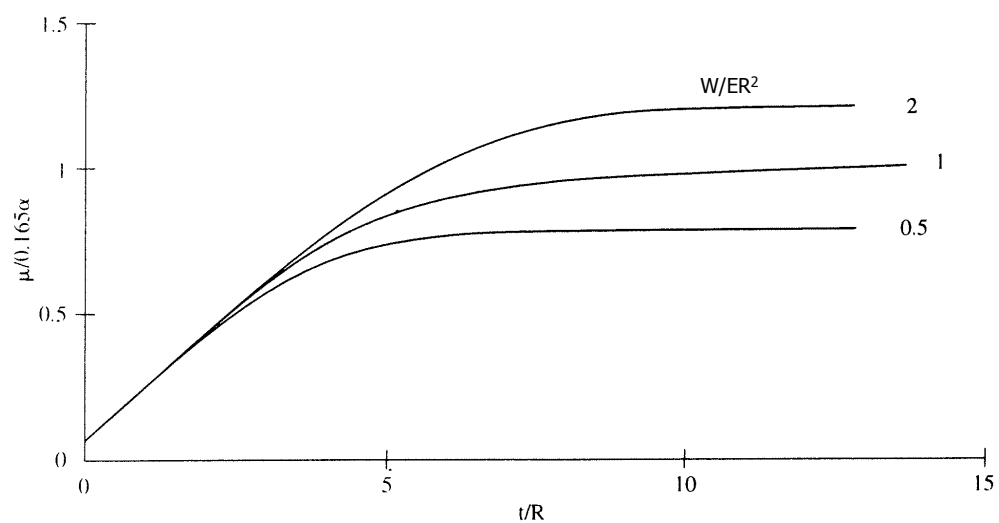
Tale coefficiente di attrito, secondo la teoria di Hertz, può essere calcolato per un semispazio elastico di spessore infinito utilizzando la formula:

$$\mu_{\infty} \simeq 0.165 \alpha \left( \frac{W}{ER^2} \right)^{1/3}$$

Essendo in questo caso in presenza di strati di spessore molto ridotto, la teoria fu estesa da Waters per renderla applicabile a strati di gomma di spessore finito ottenendo la relazione:

$$\mu = \mu_{\infty} \Phi(S)$$

dove  $\mu$  rappresenta il coefficiente di attrito per uno strato di spessore finito,  $\mu_{\infty}$  rappresenta il coefficiente di attrito per uno strato di spessore infinito (calcolabile con l'espressione di Hertz), e la quantità adimensionale  $\Phi(S)$  rappresenta una funzione di  $RW/Et^3$  che tende all'unità per  $W \rightarrow 0$  o per  $t \rightarrow \infty$ , invece tende a zero per  $t \rightarrow 0$ . Da queste relazioni si può costruire un grafico come quello presentato in Figura 3.5, dove si confrontano  $\mu$  e  $t/R$  per differenti valori del parametro di stress  $W^*$ .



**Figura 3.5.** Andamento teorico del parametro  $\mu$  al variare del rapporto  $t/R$ , calcolato per diversi valori del parametro di stress  $W/ER^2$  (Muhr, Sulong e Thomas, 1997)

---

## CAPITOLO 4

### ELABORAZIONI SPERIMENTALI PER LO STUDIO DEGLI EFFETTI LOCALI DI INDENTATION

---

In questo capitolo si va a presentare la serie di prove effettuate sul dispositivo e la strumentazione utilizzata. A differenza delle prove precedenti, eseguite solo su tavola vibrante (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007), qui sono state svolte prove di tipo sinusoidale monoassiale, per conferire una caratterizzazione al comportamento del dispositivo.

#### 4.1 Strumentazione utilizzata

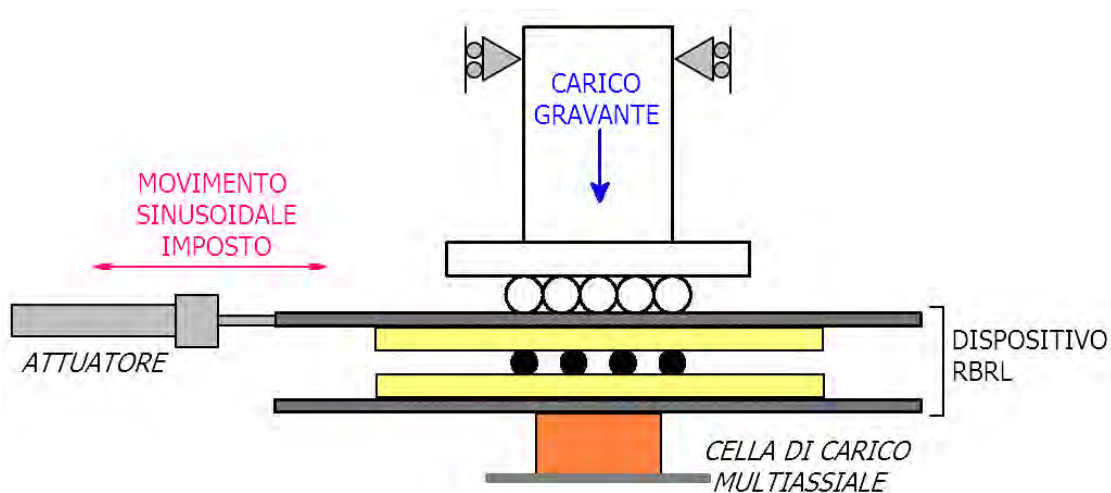
In questo paragrafo si descrive l'apparato sperimentale utilizzato per raccogliere i dati sperimentali utilizzati nelle elaborazioni successive. Lo schema dei dispositivi utilizzati è riportato in Figura 4.1.

Tutti i test sono stati condotti con una prova di taglio semplice, senza prevedere l'utilizzo di molle ricentranti. Il movimento sinusoidale è controllato dall'attuatore e trasmesso al piatto d'acciaio superiore (il quale sopporta il carico gravante sulle sfere) attraverso un giunto che permette rotazioni nel solo piano verticale.

Questa connessione è necessaria per evitare sforzi flessionali dovuti ad un non-perfetto allineamento verticale tra l'attuatore e la piastra del dispositivo, in quanto l'altezza della piastra varia nei vari test per l'utilizzo di tappetini di gomma di diverso spessore. Inoltre



risente del fatto che le sfere in gomma rotolano dentro e fuori dalle conche createsi nello strato in gomma.

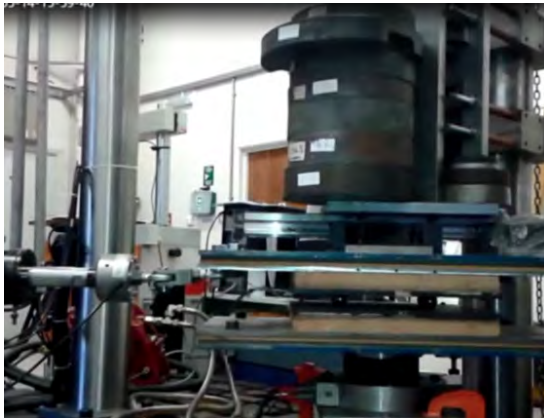


**Figura 4.1.** Schema dell'apparato sperimentale utilizzato

I due carrelli verticali, in grigio nella figura, stanno ad indicare che è presente un sistema di vincoli che impedisce al carico gravante sulle sfere di incorrere in fenomeni di *rocking*, per non inficiare i risultati delle analisi sperimentali, essendo questi considerati come effetti parassiti dannosi per la caratterizzazione del dispositivo.

Le forze orizzontali (asse X) sono misurate dalla cella di carico multiassiale fissata al di sotto della piastra d'acciaio inferiore del dispositivo. Questa soluzione è stata preferita al diretto misuramento delle forze mediante la cella di carico dell'attuatore, in modo da evitare di includere l'attrito tra la lastra superiore e le sfere che la separano dal carico verticale.

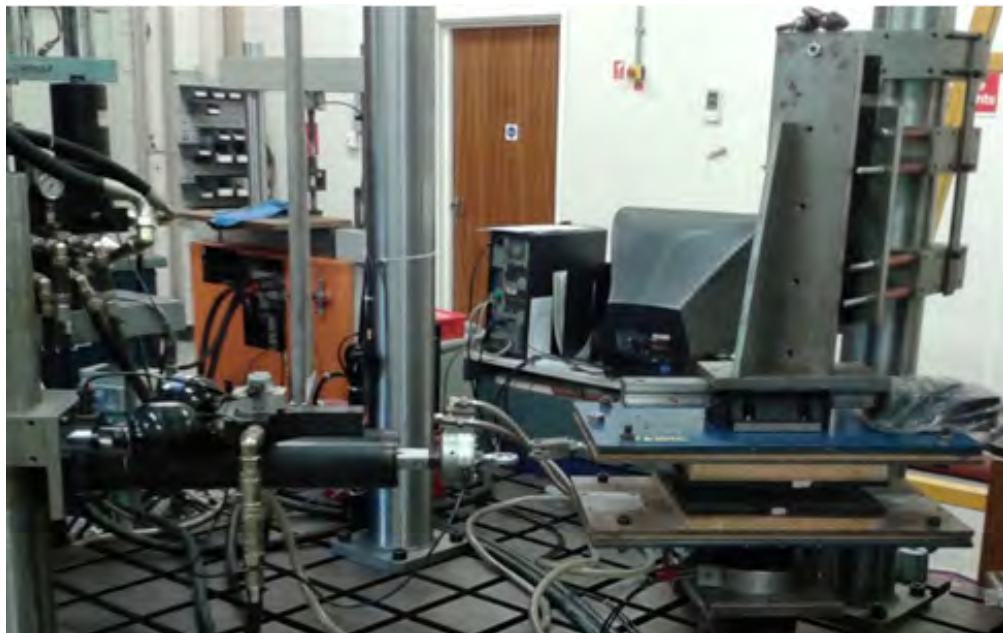
Nelle figure seguenti sono illustrate delle fotografie ritraenti l'apparato sperimentale utilizzato nella campagna sperimentale.



(a)



(b)

**Figura 4.2.** Apparato sperimentale utilizzato con peso aggiuntivo (a), (b)**Figura 4.3.** Apparato sperimentale utilizzato, vista generale

## 4.2 Tipologia di gomma utilizzata

Nella sperimentazione sono state utilizzate due differenti tipologie di gomme, chiamate composto A e composto B. Le miscele delle gomme possono essere richieste al TARRC e

fanno parte del progetto ECOEST. Nella Tabella 4.1 sono indicate le principali caratteristiche meccaniche delle gomme in questione.

Tipo di gomma	M100 [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Ultimate Elongation [%]	Trouser Tear [N/mm]	IRHD	Density [mg/mm <sup>3</sup> ]
A	0.61	21.7	836	6.8	30	0.967
B	0.79	20.6	786	21.6	43	1.100

Tabella 4.1. Caratteristiche meccaniche delle gomme A e B

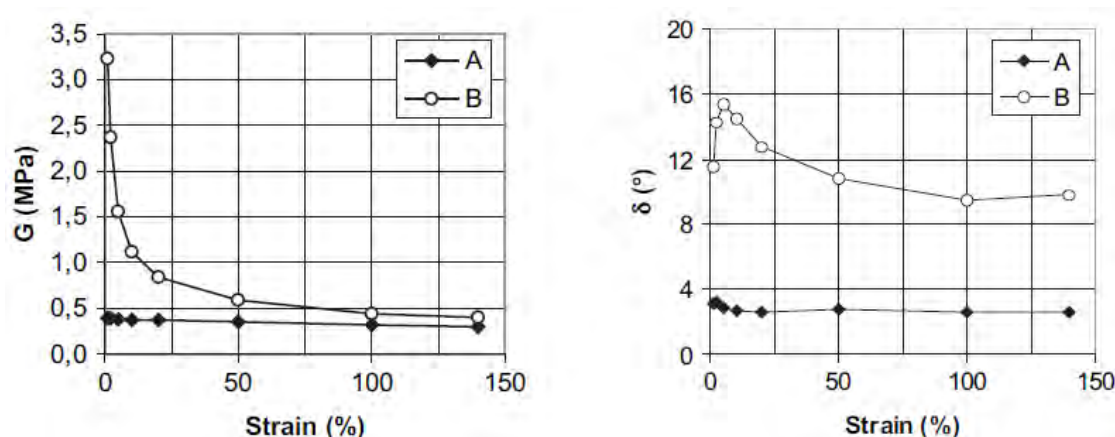


Figura 4.4. Proprietà dinamiche a taglio di gomme di tipo A e B (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007)

La Figura 4.4 illustra le differenze tra i composti A e B per quanto riguarda i parametri dinamici a taglio, misurati con una frequenza di prova pari ad 1 Hz, in funzione della deformazione.

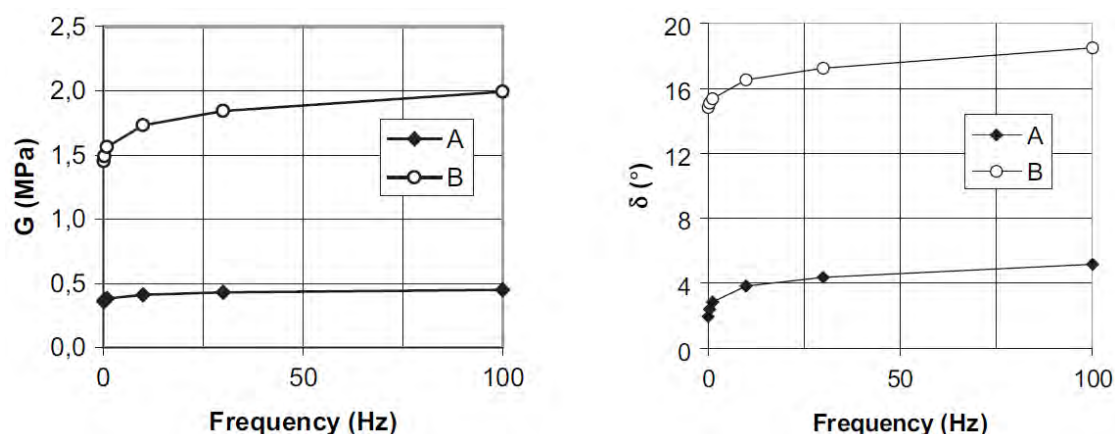


Figura 4.5. Proprietà dinamiche a taglio di gomme di tipo A e B (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007)

La Figura 4.5 invece, mostra le differenze tra i due composti in termini di frequenze [Hz], misurate per una deformazione pari al 5%.

La gomma A è di tipo naturale, con una miscela senza aggiunte, la gomma B invece è una gomma che presenta al suo interno una certa quantità di *filler*, risultando essere più costosa.

I due composti si differenziano essenzialmente in termini di *loss factor*  $\delta$ , parametro che quantifica le caratteristiche di smorzamento. Il *loss factor* esprime il rapporto tra l'energia dissipata e l'energia immagazzinata dal sistema per ogni ciclo, e viene utilizzato per quantificare il livello di smorzamento isteretico di un materiale (Ahmadi e Muhr, 1997).

Si può notare che il composto A (basso smorzamento) mostra un modulo di taglio  $G$  e valori del *loss factor* che sono indipendenti dalla deformazione, mentre per la gomma B,  $G$  e  $\delta$  dipendono dall'ampiezza di deformazione, come è tipico per le gomme con *filler*. Come ci si attendeva, il parametro  $\delta$  risulta essere sostanzialmente superiore per il composto B, mentre il modulo  $G$  è elevato per basse ampiezze di oscillazione della deformazione. Sia  $G$  che  $\delta$  non risultano essere molto sensibili al contenuto in frequenza del moto, sebbene si possa osservare un leggero incremento per entrambi i parametri all'aumentare della frequenza.

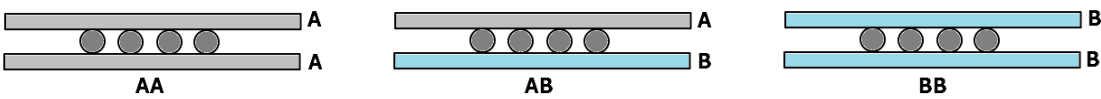
### 4.3 Raccolta dei dati

Sono state eseguite varie prove secondo diverse configurazioni di gomme, numero di sfere e tempo di stazionamento del carico in condizioni statiche, così come presentato nella Tabella 4.2.

Tipo di gomma	Numero di sfere	Carico per sfera	Tempo stazionamento
AA	6b	25 kg	6h
AA	6b	25 kg	24h
AA	6b	25 kg	96h
AA	10b	15 kg	6h
AA	10b	15 kg	24h
AA	10b	15 kg	96h
AB	6b	25 kg	24h
AB	10b	15 kg	24h
BB	6b	25 kg	24h
BB	10b	15 kg	24h

**Tabella 4.2.** Schema delle prove eseguite

La figura 4.6 illustra le diverse combinazioni di gomme A e B utilizzate per condurre la campagna sperimentale.



**Figura 4.6.** Configurazione delle gomme utilizzata per i vari test sperimentali

Le eccitazioni sinusoidali in termini di spostamento utilizzate nei test sono riportate nelle Tabelle 4.3 e 4.4. La prima tabella mostra i cicli sinusoidali di piccola ampiezza (sfere all'interno dei *pits*), tra 1 e 5 mm, eseguite a frequenze diverse per mantenere il massimo valore della velocità costante: sono state assunte tre diverse velocità, 31.4, 62.8 e 125.6 mm/s.

Test Input 1			
Amplitude [mm]	Frequency [Hz]	Max. velocity [mm/s]	N° cycles [-]
1	5.00	31	3
1.5	3.33		
2.5	2.00		
5	1.00		
1	10.00	63	
1.5	6.67		
2.5	4.00		
5	2.00		
1	20.00	126	
1.5	13.33		
2.5	8.00		
5	4.00		

**Tabella 4.3.** Primo input sinusoidale, corrispondente alle *small amplitudes*, con le sfere che rotolano all'interno dei *pits*

Gli altri tre input sinusoidali includono cicli che variano dai 6 ai 70 mm in ampiezza (Tab. 4.4) e sono stati condotti separatamente per tre casi a diverse velocità. Ogni test include tre cicli sinusoidali.

	Test Input 2	Test Input 3	Test Input 4	
	Max vel. = 31 [mm/s]	Max vel. = 63 [mm/s]	Max vel. = 126 [mm/s]	
Amplitude [mm]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	N° cycles [-]
6	0.83	1.67	3.33	3
7	0.71	1.43	2.86	
8	0.63	1.25	2.50	
9	0.56	1.11	2.22	
10	0.50	1.00	2.00	
12.5	0.40	0.80	1.60	
15	0.33	0.67	1.33	
20	0.25	0.50	1.00	
30	0.17	0.33	0.67	
40	0.13	0.25	0.50	
50	0.10	0.20	0.40	
70	0.07	0.14	0.29	

**Tabella 4.4.** Organizzazione dei test per le ampiezze varianti tra i 6 e i 70 mm

La ragione che ha spinto a eseguire i test per ampiezze tra 1 e 5 mm, per tutte le velocità assunte, prima degli altri ad ampiezze maggiori risiede nel fatto di poter studiare gli effetti della velocità nel funzionamento del dispositivo RBRL anche per piccoli spostamenti, per i quali il moto è molto influenzato dagli effetti di recupero della gomma nei *pits*.

Un'ultima e doverosa considerazione deve essere fatta riguardo l'età dei tappetini in gomma testati: questi sono stati recuperati dal progetto ECOEST del 1999, dunque ben 15 anni prima dei nuovi test eseguiti al TARRC.

Di seguito si riportano dei grafici che illustrano i risultati sperimentali ottenuti mediante le prove monoassiali di tipo sinusoidale per una gomma di tipo AA-6b-6h, secondo lo schema presentato nelle tabelle precedenti.

La prima immagine illustra i risultati ottenuti per le prove condotte a piccole ampiezze, e in seguito quelli ottenuti a velocità costante 31 mm/s.

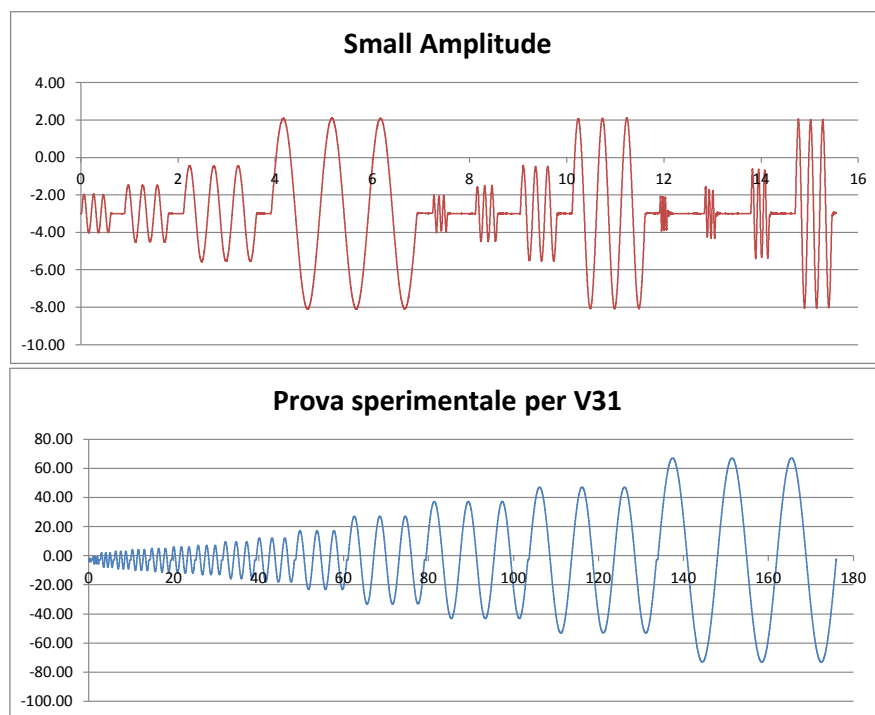
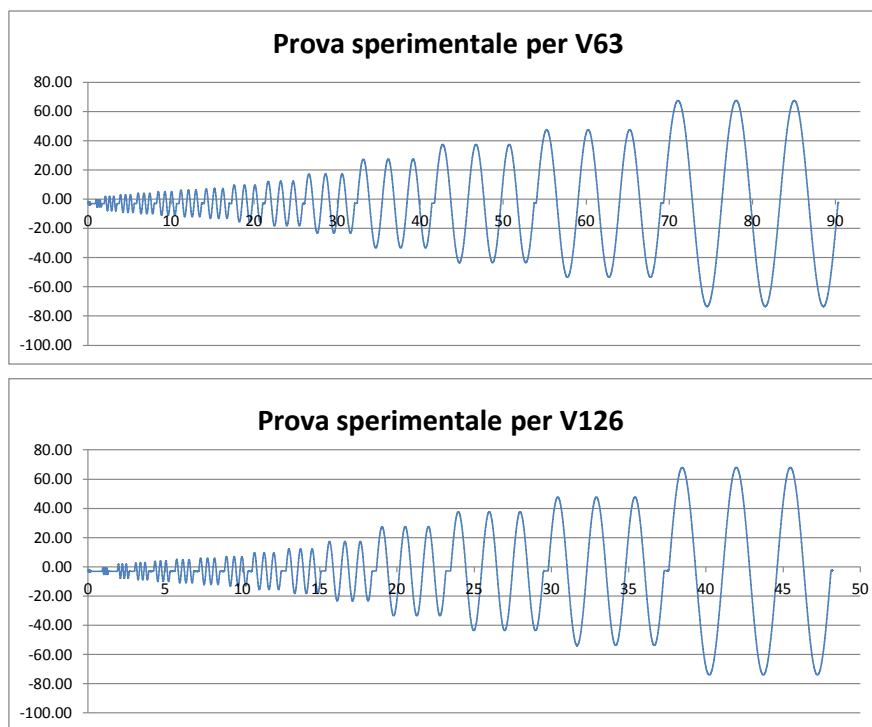


Figura 4.7. Test sperimentali per *Small Amplitude* e per V31

L'immagine seguente invece mostra i risultati ottenuti effettuando i test sinusoidali per le

ampiezze maggiori e con velocità costanti pari a 63 m/s e 126 m/s.



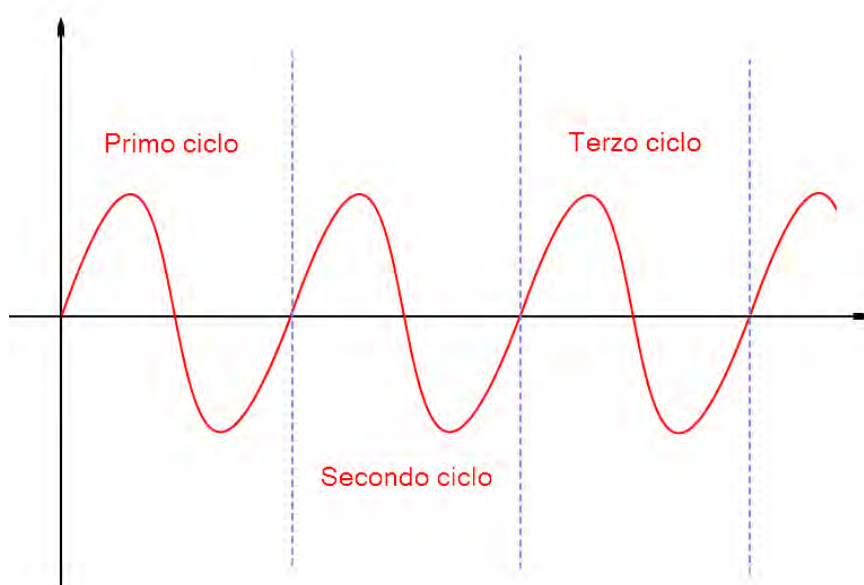
**Figura 4.8.** Test sperimentali per V63 e V126

Nei paragrafi successivi verrà presentata la pulizia e la rielaborazione di questi dati sperimentali, eseguita utilizzando il software *Matlab* e il programma *Excel* del pacchetto *Office*.

## 4.4 Organizzazione dei dati raccolti

I dati sperimentali raccolti nei vari test eseguiti sono poi stati divisi secondo i vari cicli (tre per ogni ampiezza a velocità fissata), nel modo indicato in Figura 4.9, inglobando in realtà qualche valore prima dell'inizio e qualche valore dopo la fine di ogni ciclo, in modo da ottenere un miglior filtraggio dei dati con *Matlab*.



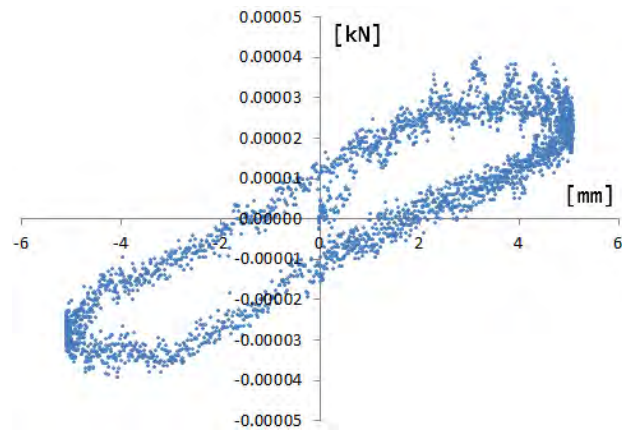


**Figura 4.9.** Divisione dei cicli per i dati raccolti

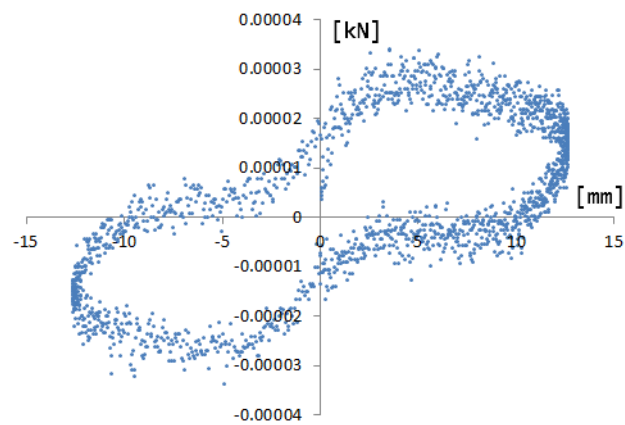
Dunque per ogni velocità di prova considerata e per ogni ampiezza di spostamento sono disponibili di volta in volta tre cicli sinusoidali completi. Si può sfruttare dunque un *database* di dati sostanzioso, per ben caratterizzare il comportamento del dispositivo e studiarne gli effetti locali.

## 4.5 Rappresentazione dei dati

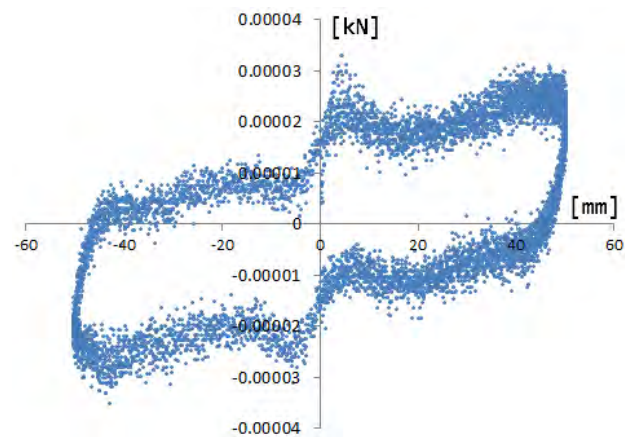
I dati ottenuti dalla sperimentazione sono poi stati rappresentati mediante *scatter plot* come quello in Fig. 4.10, sull'asse delle ascisse sono rappresentati gli spostamenti (in mm), mentre sull'asse delle ordinate si riporta il valore della forza misurata (in kN). Questi grafici sono stati creati per diverse ampiezze di spostamento nella prova sinusoidale relativi ad ogni configurazione di gomma, sfere e tempo di stazionamento studiata, per avere un controllo grafico sui dati registrati.



**Figura 4.10.** Scatter plot dei dati per amplitudine 5 mm a v31 per la tipologia AA\_6b\_6h



**Figura 4.11.** Scatter plot dei dati per amplitudine 12.5 mm a v31 per la tipologia AA\_6b\_6h



**Figura 4.12.** Scatter plot dei dati per amplitudine 50 mm a v31 per la tipologia AA\_6b\_6h

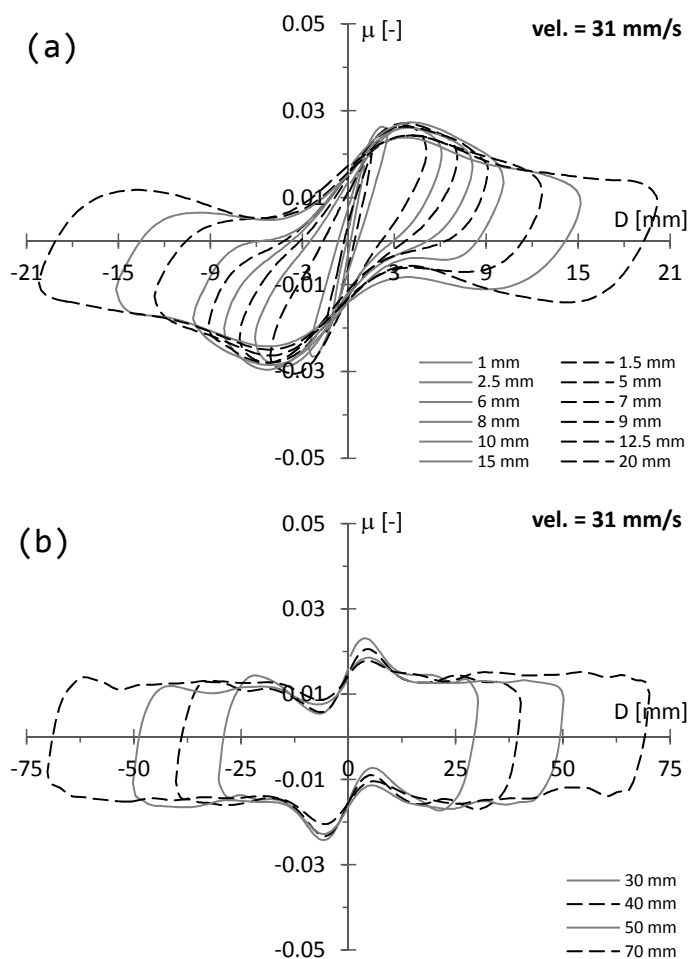
I tre grafici precedenti danno un'idea dell'evoluzione della forma e dell'ampiezza del ciclo

al crescere dell'ampiezza di spostamenti utilizzata nella prova sinusoidale considerata. Un particolare che si può notare osservando i grafici è la progressiva riduzione di “rumore” al progressivo aumentare dell'ampiezza, basti osservare la nitidezza e la definizione dell'ultimo ciclo rispetto a quello ottenuto per 5 mm di ampiezza.

## 4.6 Pulizia dei dati sperimentali

Il segnale ottenuto dal test sinusoidale è stato poi opportunamente ripulito ed elaborato attraverso un programma Matlab opportunamente calibrato utilizzando in particolare un filtro di Butterworth di tipo passa-basso di primo ordine. Esso permette il solo passaggio di frequenze al di sotto di una data soglia detta frequenza di taglio. Al di là di tale frequenza il filtro elimina le componenti in frequenza del segnale.

Nelle figure seguenti si riportano i risultati ottenuti in seguito all'elaborazione ad alla pulizia del segnale per il test AA\_6b\_6h riferiti al secondo ciclo, per la velocità di test 31 mm/s. Nella Fig. 4.13a vengono mostrati i risultati per le ampiezze di spostamento fino a 20 mm, in modo da rendere ben visibile il fenomeno per le ampiezze minori, le cosiddette *small amplitudes*, che altrimenti verrebbero “schiacciate” nella rappresentazione se si dovessero spingere gli spostamenti fino a 70 mm, perdendo di significatività concettuale.



**Figura 4.13.** Risultati dell'elaborazione per il secondo ciclo a v31

Nella Fig. 4.13b invece, sono mostrati i risultati ottenuti per gli spostamenti maggiori, per ampiezze che variano dai 30 ai 70 mm.

## 4.7 Grafici di inviluppo

Infine è utile rappresentare i risultati raccolti in un diagramma di inviluppo, in modo da visualizzare il ciclo finale assegnabile alla configurazione studiata. Per il caso v31 i dati sono stati raccolti nella figura 4.14.

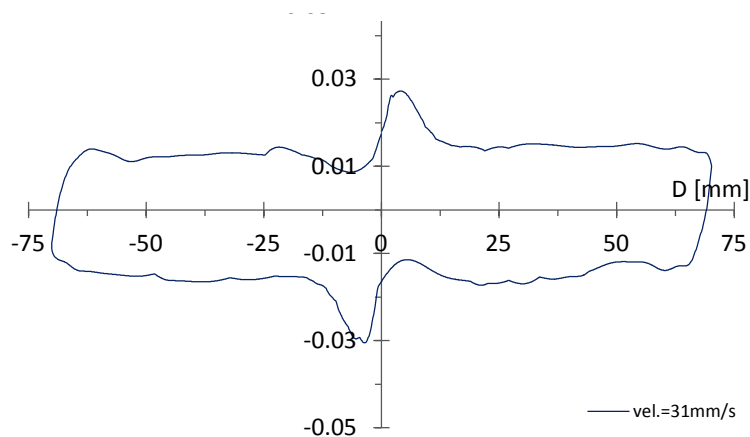


Figura 4.14. Involuppo dei dati elaborati, ciclo 2 a v31

Lo stesso procedimento è stato eseguito per tutte le prove e per i tre cicli di ognuna di esse, riportando poi gli involuppi per le tre velocità in un grafico complessivo, come quello mostrato in Fig. 4.15, dove sono mostrati gli involuppi per il ciclo 2 della prova AA\_6b\_6h.

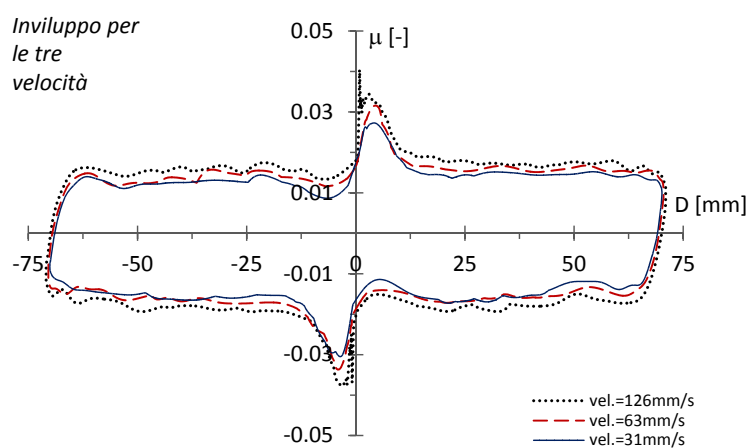


Figura 4.15. Involuppo per il ciclo 2 inglobante le tre velocità

Nelle figure seguenti si mostrano i risultati ottenuti invece negli involuppi ottenuti per i cicli 1 e 3 sempre per stessa prova.

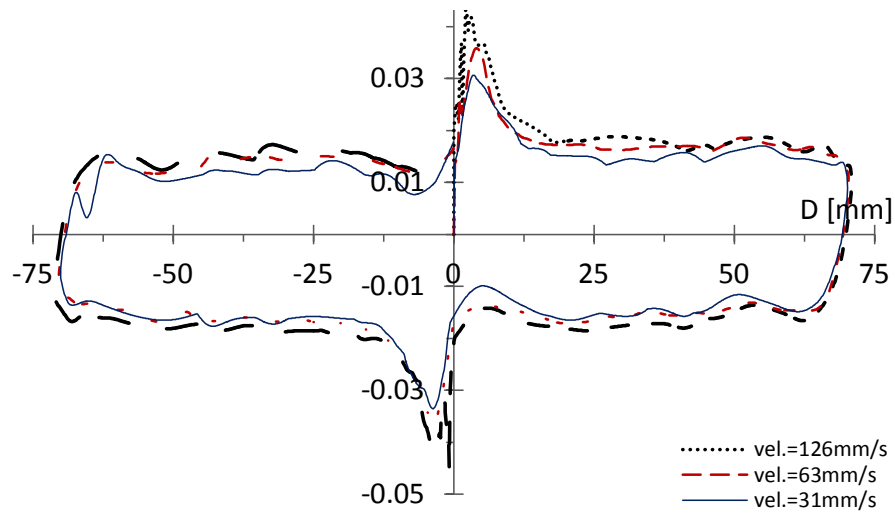


Figura 4.16. Inviluppo per il ciclo 1 inglobante le tre velocità

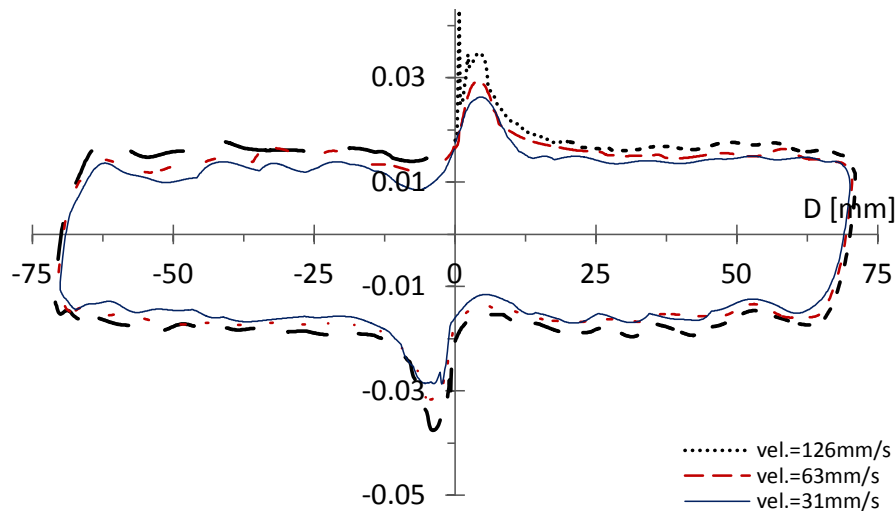
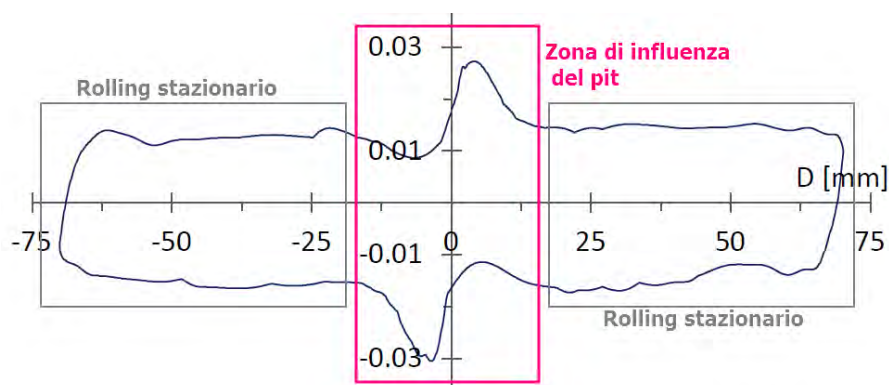


Figura 4.17. Inviluppo per il ciclo 3 inglobante le tre velocità

Come si può notare dai grafici di inviluppo ottenuti, si notano due picchi nell'intorno dei 5 mm rispetto all'origine. Sono appunto i picchi che rappresentano i valori di picco della forza di *roll-out* che devono vincere le sfere d'acciaio per poter uscire dalla loro conca.



**Figura 4.18.** Zona di influenza del *pit* e zona di rotolamento stazionario

Una volta superato il picco, il coefficiente di attrito  $\mu$  si assesta su un valore costante per le ampiezze superiori, dove il comportamento del dispositivo diventa indipendente dalla velocità di esecuzione della prova, infatti per le ampiezze superiori le tre linee di inviluppo di Figura 4.17 tendono a coincidere. Queste due zone sono evidenziate in rosa e grigio nella Figura 4.18, che illustra la separazione tra la zona affetta da problemi locali e la zona di funzionamento in stato stazionario per le grandi ampiezze di spostamento.

Per la procedura di progettazione prevista nel Capitolo 5 infatti, si farà riferimento alla condizione di rotolamento di tipo stazionario, ipotizzando che in caso di sisma le ampiezze delle oscillazioni del dispositivo siano debitamente ampie, ovvero considerando la parte riquadrata in grigio in Figura 4.18.

## 4.8 Elaborazione dei dati

I dati raccolti ed elaborati nelle analisi precedenti sono stati poi ulteriormente rimaneggiati per calcolare una serie di parametri necessari per descrivere il comportamento del dispositivo. Sono state prodotte quindi, per ogni prova studiata e per i cicli 1 e 2 di ogni test, secondo le 3 diverse velocità di sperimentazione, delle tabelle come quella raffigurata in Tab.4.5.

v=31 mm/s					
Cycle_1					
Ampl	Freq	K'	K''	K*	$\delta$
[mm]	[Hz]	[1/mm]	[1/mm]	[1/mm]	[°]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
1.00	5.00	0.0154	-0.0024	0.0156	8.86
1.50	3.33	0.0133	0.0014	0.0134	6.01
2.50	2.00	0.0102	0.0025	0.0105	13.77
5.00	1.00	0.0056	0.0021	0.0060	20.56
6.00	0.83	0.0041	0.0019	0.0045	24.86
7.00	0.71	0.0032	0.0018	0.0037	29.36
8.00	0.63	0.0027	0.0018	0.0032	33.69
9.00	0.56	0.0022	0.0016	0.0027	36.03
10.00	0.50	0.0017	0.0015	0.0023	41.42
12.50	0.40	0.0011	0.0013	0.0017	49.76
15.00	0.33	0.0007	0.0011	0.0013	57.53
20.00	0.25	0.0003	0.0009	0.0009	71.57
30.00	0.17	0.0002	0.0006	0.0006	71.57
40.00	0.13	0.0001	0.0004	0.0004	75.96
50.00	0.10	0.0001	0.0004	0.0004	75.96
70.00	0.07	0.0000	0.0002	0.0002	90.00

**Tabella 4.5.** Elaborazioni dei parametri calcolati per v31

Accanto ad ampiezza e frequenza sono stati riportati i parametri dinamici per caratterizzare le gomme, già introdotti al paragrafo 2.1.1 di questa tesi. I valori ottenuti sono infatti utili per calibrare un modellino Kelvin utilizzando uno dei procedimenti di linearizzazione già esposti al paragrafo 2.1.4 (in questo caso si è utilizzato il metodo armonico).

Per completezza si riportano anche le tabelle (Tab.4.6) che illustrano i valori calcolati, sempre nello stesso ciclo, per v63 e v126, in modo da dare un'idea generale dei valori numerici calcolati nelle varie elaborazioni eseguite.



v=63 mm/s						v=126 mm/s					
Cycle_1						Cycle_1					
Ampl	Freq	K'	K''	K*	$\delta$	Ampl	Freq	K'	K''	K*	$\delta$
[mm]	[Hz]	[1/mm]	[1/mm]	[1/mm]	[°]	[mm]	[Hz]	[1/mm]	[1/mm]	[1/mm]	[°]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
1.00	10.00	0.0155	-0.0063	0.0167	22.12	1.00	20.00	-0.0035	-0.0320	0.0322	96.24
1.50	6.67	0.0156	-0.0016	0.0157	5.86	1.50	13.33	0.0149	-0.0141	0.0205	43.42
2.50	4.00	0.0111	0.0014	0.0112	7.19	2.50	8.00	0.0139	-0.0022	0.0141	8.99
5.00	2.00	0.0062	0.0021	0.0065	18.71	5.00	4.00	0.0075	0.0013	0.0076	9.83
6.00	1.67	0.0049	0.0021	0.0053	23.20	6.00	3.33	0.0060	0.0012	0.0061	11.31
7.00	1.43	0.0036	0.0019	0.0041	27.82	7.00	2.86	0.0044	0.0018	0.0048	22.25
8.00	1.25	0.0028	0.0020	0.0034	35.54	8.00	2.50	0.0032	0.0019	0.0037	30.70
9.00	1.11	0.0021	0.0018	0.0028	40.60	9.00	2.22	0.0026	0.0018	0.0032	34.70
10.00	1.00	0.0017	0.0017	0.0024	45.00	10.00	2.00	0.0020	0.0017	0.0026	40.36
12.50	0.80	0.0011	0.0014	0.0018	51.84	12.50	1.60	0.0013	0.0015	0.0020	49.09
15.00	0.67	0.0007	0.0012	0.0014	59.74	15.00	1.33	0.0008	0.0013	0.0015	58.39
20.00	0.50	0.0003	0.0009	0.0009	71.57	20.00	1.00	0.0005	0.0010	0.0011	63.43
30.00	0.33	0.0002	0.0006	0.0006	71.57	30.00	0.67	0.0002	0.0007	0.0007	74.05
40.00	0.25	0.0001	0.0005	0.0005	78.69	40.00	0.50	0.0001	0.0005	0.0005	78.69
50.00	0.20	0.0001	0.0004	0.0004	75.96	50.00	0.40	0.0001	0.0004	0.0004	75.96
70.00	0.14	0.0001	0.0003	0.0003	71.57	70.00	0.29	0.0001	0.0003	0.0003	71.57

Tabella 4.6. Elaborazioni dei parametri calcolati per v63 e v126

## 4.9 Confronti ed analisi

I dati raccolti, organizzati ed elaborati, sono stati poi utilizzati per eseguire dei confronti tra velocità diverse all'interno dello stesso ciclo, oppure tra cicli diversi della stessa prova sperimentale considerando le varie velocità come parametri di raffronto. Dunque si è cercato di sfruttare diverse combinazioni dell'insieme di parametri da esaminare per raccogliarli di volta in volta in gruppi diversi in modo da cercare di cogliere le varie peculiarità che contraddistinguono il fenomeno dell'*indentation*.

Sono state poi anche comparate le diverse prove, per uguale tempo di stazionamento (24 h) ma variando la tipologia di gomma utilizzata, oppure mantenendo la stessa gomma (AA) e variando invece i vari tempi di stazionamento.

### 4.9.1 Confronti all'interno della singola prova

Innanzitutto si riportano i confronti eseguiti all'interno della prova sperimentale AA\_6b\_6h, prima al variare dei cicli mantenendo fisse le velocità, poi al variare delle velocità fissando invece il ciclo.

#### 4.9.1.1 Confronto tra i cicli per v31

In questo paragrafo ci si occupa di confrontare tra loro i cicli relativi alla prova sperimentale sopracitata, mantenendo costante la velocità (v31). I parametri che sono stati confrontati sono le proprietà dinamiche delle gomme esposte al paragrafo 2.1.1.

Nella figura seguente (Fig.4.19) viene riportato l'andamento del parametro  $K'$  per la velocità 31mm/s. L'equazione interpolante, espressione di tipo esponenziale, viene applicata al ciclo 2 per i valori di amplitude da zero a 5 mm, ovvero per la zona considerata all'interno del pit, cioè della fossetta nella quale alloggiavano le sfere in acciaio, che si forma per effetto del carico stazionario agente per un lungo tempo su un mezzo viscoelastico.

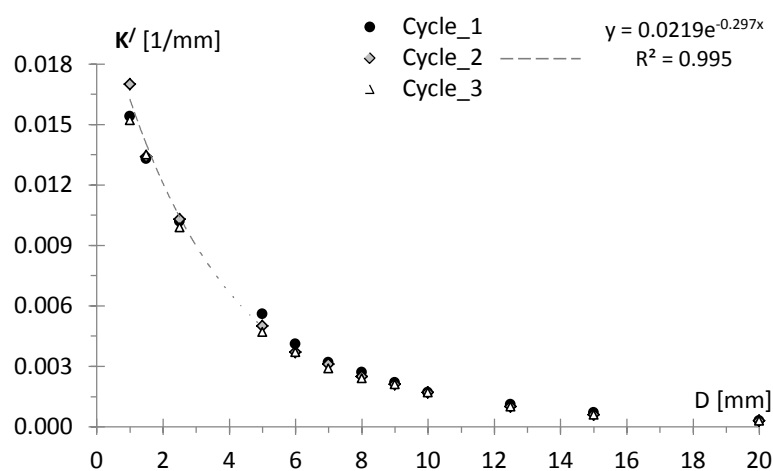
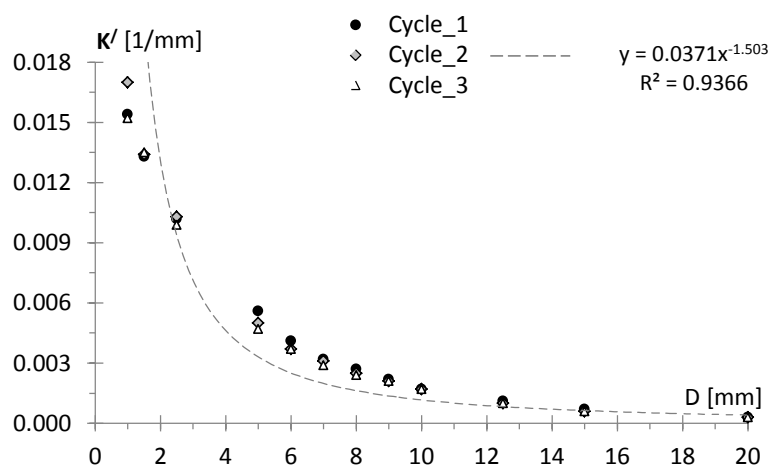


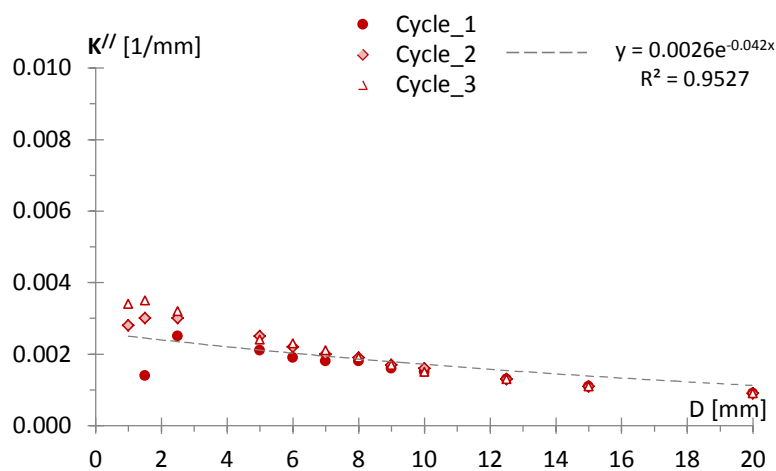
Figura 4.19. Andamento di  $K'$  interpolato nel pit, per v31

A titolo esemplificativo si riporta lo stesso grafico (Fig. 4.20) con la differenza di aver eseguito un'interpolazione lineare che interessa tutti i punti e non limitata alla prima zona (*small amplitudes*).

Figura 4.20. Andamento di  $K'$  per v31

Nel secondo caso è stata utilizzata un'interpolazione di tipo "potenza", in quanto il valore del coefficiente di correlazione  $R^2$  risulta molto più elevato utilizzando questo tipo di modello.

Nella Figura 4.21 si riporta invece l'andamento del parametro  $K''$ :

Figura 4.21. Andamento di  $K''$  per v31

In questo caso l'interpolazione per i dati relativi al comportamento nel pit non ha prodotto variazioni rispetto a quella ottenuta considerando tutta la serie, perciò si è riportato un unico grafico in questo caso.

Osservando i grafici ottenuti e tenendo conto di quanto esposto al paragrafo 2.1.4, ovvero ricordando che:

$$\begin{cases} k \equiv K' \\ c \equiv K''/\omega \end{cases}$$

si può paragonare dunque il valore di  $K'$  ad un “indicatore” di rigidezza, notando come esso sia molto significativo a livello delle *small amplitude*, per il comportamento nel pit, quando la sfera non è libera di muoversi ma ostacolata dalle pareti in gomma. Tra 0 e 5 mm infatti si osservano i massimi valori di rigidezza, che poi vanno ad abbattersi all’aumentare dello spostamento, raggiunge infatti un valore quasi costante superati i 15 mm. La presenza della conca provoca dunque l’insorgere di alcuni picchi di forza che la sfera deve vincere per effettuare il *roll-out*.

Il valore di  $K''$  consente invece di trarre delle conclusioni in termini di smorzamento (come si può osservare dalla seconda equazione del sistema sopra riportato). Si nota che il pit non influisce più di tanto in termini di smorzamento, il valore di  $K''$  infatti resta pressoché costante al variare dello spostamento, ha solo un leggero aumento rispetto alla media per le *small amplitudes*, ma si può considerare trascurabile.

#### 4.9.1.2 Confronto tra i cicli per v63

Ora si andranno a confrontare i vari cicli, considerando però la v63 come riferimento. In questo caso si è scelto di riportare al posto di  $K'$  e  $K''$  come nel caso precedente, i valori di  $K^*$  e  $\delta$  che racchiudono informazioni simili ai precedenti, infatti:

$$\begin{cases} K^* = \sqrt{K'^2 + K''^2} \\ \tan \delta = K''/K' \end{cases}$$

Nella Fig.4.22 si riporta l’andamento di  $K^*$  per la prova considerata, interpolando i valori per la zona di pit. Si nota come l’andamento della funzione rispecchi abbastanza fedelmente quello per il grafico di  $K'$  per v31. Essendo infatti  $K''$  pressoché costante e guardando

la formula per calcolare il  $K$  complesso sopra riportata, si può capire come esso fornisca informazioni riguardo la rigidità del sistema, in modo simile a  $K'$ .

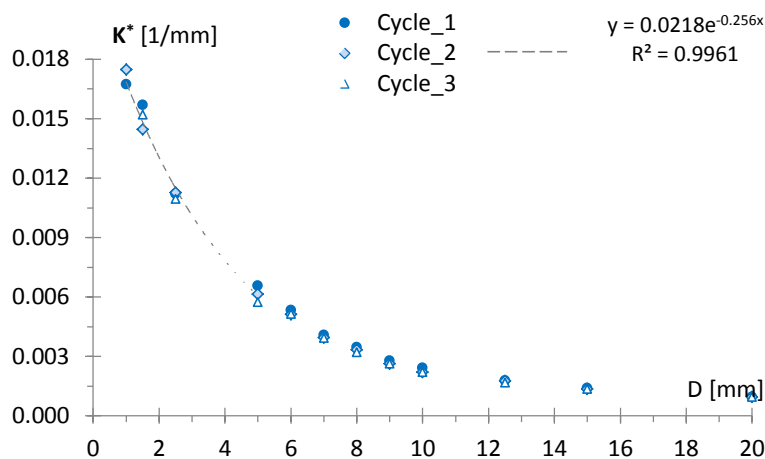


Figura 4.22. Andamento di  $K^*$  per v63

Di seguito invece si propone l'andamento del parametro  $\delta$ , il quale fornisce informazioni riguardo la dissipazione in termini di smorzamento, infatti  $\xi \approx \frac{1}{2} \tan \delta$ , offrendo un'interpretazione più vicina al classico modo di ragionare ingegneristico, legato all'uso degli spettri smorzati utilizzati nelle analisi sismiche.

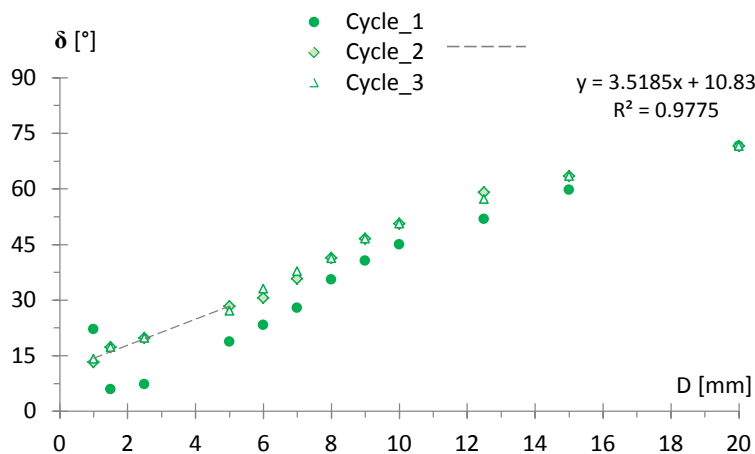


Figura 4.23. Andamento di  $\delta$  interpolato nel pit, per v63

Come si nota dai grafici sopra riportati (Figg. 4.22 e 4.23), mentre  $K^*$  decresce al crescere dello spostamento,  $\delta$  subisce una variazione opposta. Ricordando che  $\tan \delta = K''/K'$ , si

capisce come, anche in questo caso, il valore  $K''$  (che rappresenta l'area racchiusa dal ciclo) resti circa costante.

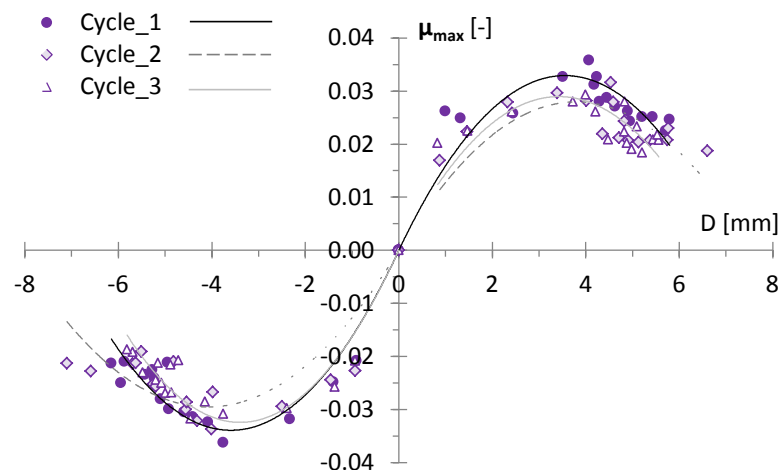


Figura 4.24. Andamento di  $\mu$  interpolato nel pit, per v63

La Figura 4.24 illustra l'andamento del parametro  $\mu$  all'interno del pit, e si può notare come esso abbia una forma sinusoidale, con valori di picco raggiunti intorno ai 4 mm, per poi decrescere spostandosi verso i 6 mm, dunque dopo avere effettuato il *roll-out*.

#### 4.9.1.3 Confronto tra le velocità per il ciclo 2

Oltre a confrontare i diversi cicli tra loro mantenendo fissa la velocità, può tornare utile paragonare le diverse velocità di test mantenendo però fisso il ciclo. Si riportano in questo paragrafo i risultati ottenuti per il ciclo più stabile, ovvero il ciclo 2.

In primo luogo si riporta un grafico (Fig. 4.25) che illustra l'andamento del parametro  $K'$  per le diverse velocità confrontate per il ciclo 2.

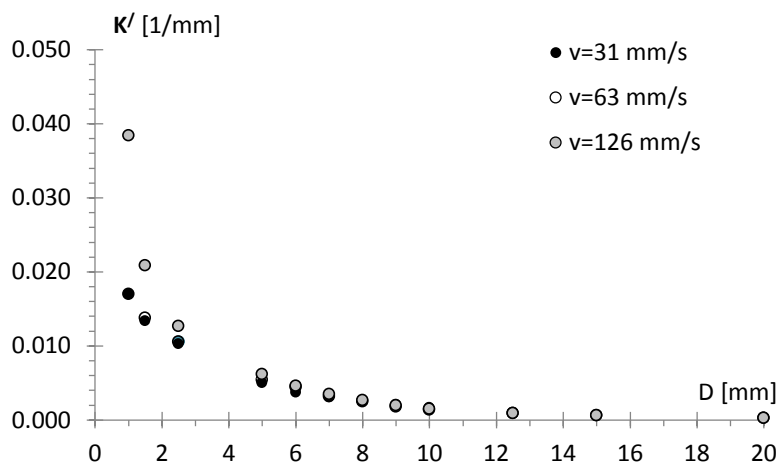
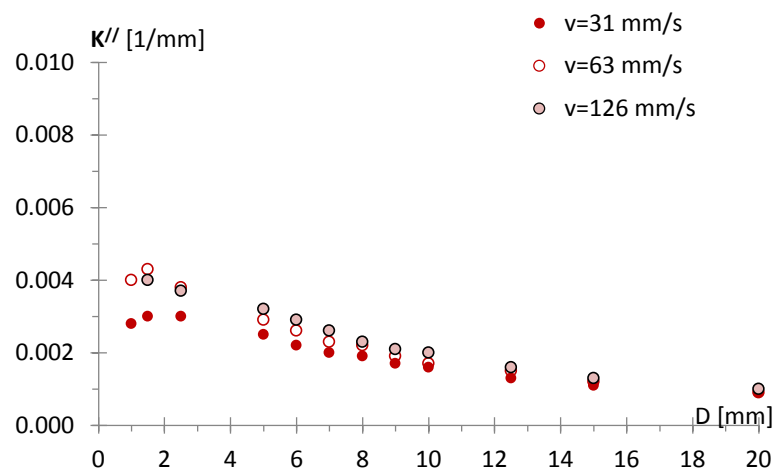


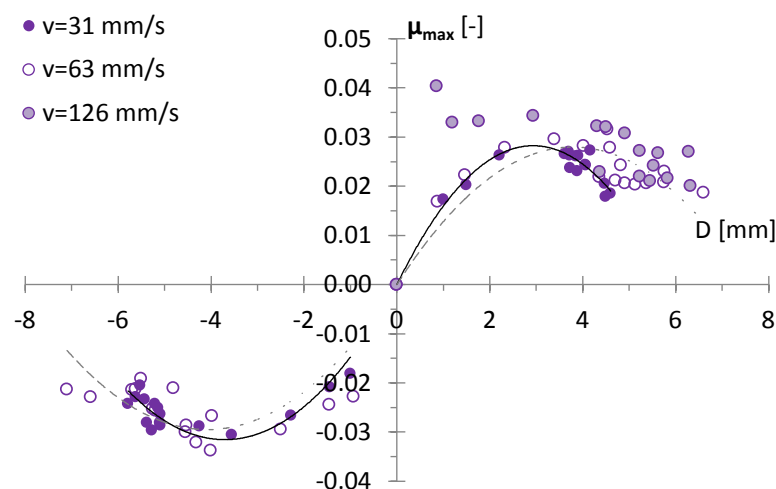
Figura 4.25. Andamento di  $K'$  interpolato nel pit, per il ciclo 2

Come si può notare dal grafico, il parametro  $K'$ , che rappresenta appunto la rigidezza del sistema, cresce al crescere della velocità di sperimentazione utilizzata. È evidente che la presenza del pit influisca significativamente sul valore della rigidezza. Per tutte e tre le velocità, superata la zona di influenza del pit (primi 15 mm), il valore di  $K'$  diventa pressoché costante.

Il grafico seguente (Fig. 4.26) mostra l'andamento del parametro  $K''$  al variare delle velocità. Anche in questo caso le tre serie sono disposte in ordine verticalmente crescente in base alle rispettive velocità. Sembra che per la zona del pit si abbiano valori di  $K''$  leggermente superiori, ciò sta ad indicare una maggiore area racchiusa dal ciclo di isteresi, dunque una maggiore, anche se lieve, dissipazione.

Figura 4.26. Andamento di  $K''$  per il ciclo 2

Nella figura seguente (Fig. 4.27) si riporta invece l'andamento del coefficiente di attrito  $\mu$ .

Figura 4.27. Andamento di  $\mu$  per il ciclo 2

Dalla figura si nota come esso mostri un valore di picco intorno ai 3-4 mm per poi decrescere. Sembra che il valore di  $\mu$  aumenti all'aumentare della velocità di esecuzione della prova nello stesso ciclo. Quando il rotolamento si porta in stato stazionario, invece, il coefficiente di attrito si assesta su valori costanti che dipendono dallo spessore del tappetino in gomma, dal diametro della sfera e dal parametro di stress, come spiegato al paragrafo 3.4.



#### 4.9.1.4 Analisi con software statistico

Utilizzando il software statistico Minitab è stato riesaminato il ciclo due della prova sopra indicata, in modo da trarre alcune conclusioni sull'ordine di raccolta dei dati e sulla bontà del campionamento statistico. In Figura 4.28 è stata eseguita un'analisi di regressione non lineare, utilizzando un'equazione di tipo esponenziale, dove sono stati determinati due parametri theta per fittare i dati. L'equazione interpolante risulta essere la seguente:

$$K' = 0.022 e^{-0.274 \cdot amplitude}$$

L'andamento esponenziale predetto risulta essere ottimo in quanto si ottiene un parametro SSE=0.0000009 (somma dei residui al quadrato).

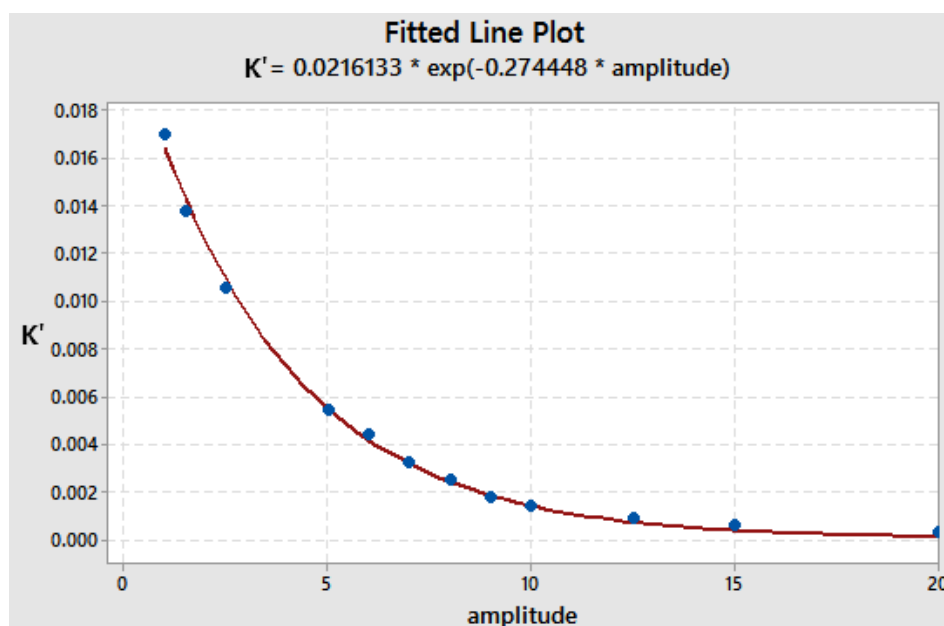


Figura 4.28. Regressione non lineare, Minitab

La Figura 4.29 invece illustra l'analisi dei residui ottenuta per i dati utilizzati nella regressione.

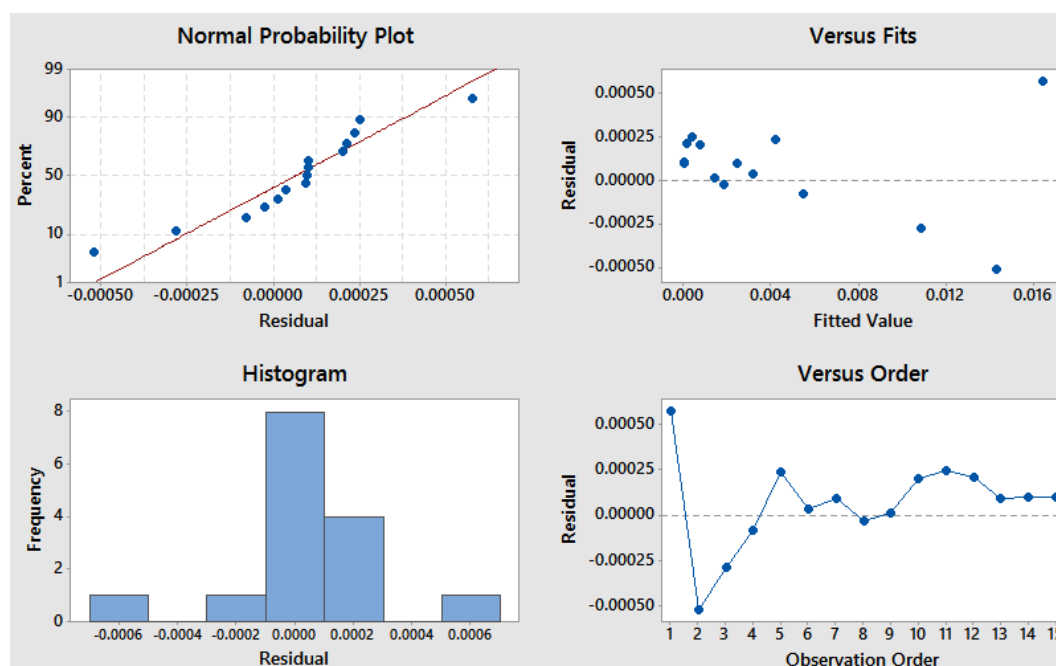


Figura 4.29. Analisi dei residui

Osservando i grafici dei residui si nota che essi rispettano l'ipotesi di distribuzione normale (primo grafico). Invece il grafico in basso a destra analizza l'ordine di raccolta dei dati nel tempo e mostra che per i primi dati raccolti vi sono grandi scostamenti rispetto agli ultimi. Si ricorda che i primi dati appartengono alle cosiddette *small amplitudes* dunque all'interno delle conche scavate dalle sfere in acciaio. Questo tipo di trend si osserva anche per le altre serie di dati esaminate nella tesi. Dunque si può concludere che la raccolta dei dati sia stata più delicata per le prime misurazioni di ogni serie, forse anche in quanto è richiesta una maggiore sensibilità nell'apparecchio di misurazione.

#### 4.9.2 Considerazioni sul recupero della gomma

Il primo test che viene eseguito, per ogni configurazione di sfere e tempi di stazionamento, è il test sulle *small amplitudes*, per poi passare a v31, v63 e infine v126. Per il test eseguito all'interno del pit si considera che la gomma al di sotto della sfera sia pressoché indisturbata, ovvero che essa non abbia il tempo sufficiente per recuperare, in virtù delle sue proprietà di

viscoelasticità.

Al procedere dei test, però, la sfera comincia ad entrare ed uscire dalla conca che si è creata nel tempo, cosicché nel lasso di tempo nel quale la sfera esce dalla zona di influenza del pit per rotolare sul tappetino vergine, la gomma comincia a manifestare effetti di recupero, dunque tende a rendere sempre più piccolo il “gradino” che separa la conchetta dal resto della gomma indisturbata, riducendo gli effetti di picco dall’inizio alla fine delle prove sperimentali.

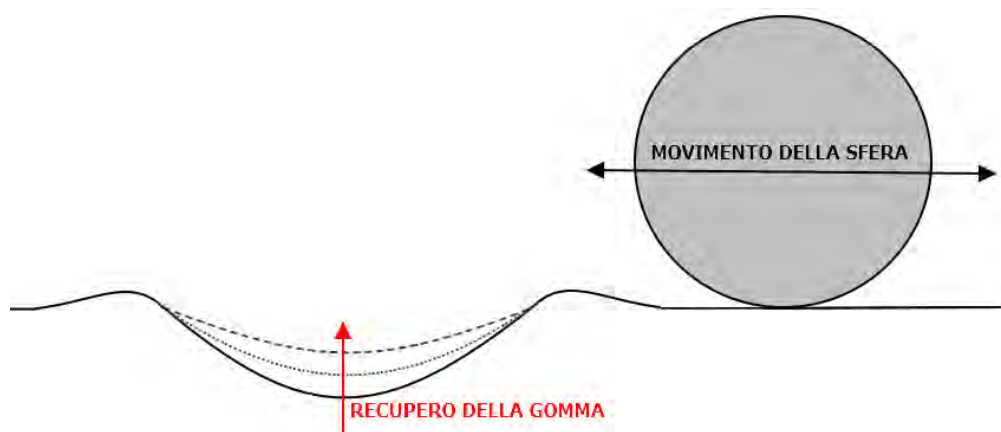


Figura 4.30. Recupero della gomma nel tempo

Questo comportamento è illustrato schematicamente in Figura 4.30, e come si può comprendere, il recupero è sempre maggiore al passare del tempo, per essere massimo alla fine del test performed a v126. Questo comportamento dovrebbe essere più evidente per i test eseguiti a v31 e via via ridursi fino al test a v126, mostrando una progressiva diminuzione nella forza di picco. Osservando i grafici precedenti si può notare come per i punti ottenuti entro i 5 mm, soprattutto per il valore di  $K'$ , il ciclo 1 si trovi leggermente al di sopra degli altri due per prove eseguite alla stessa velocità.

### 4.9.3 Effetti dovuti al tempo di stazionamento, gomma AA

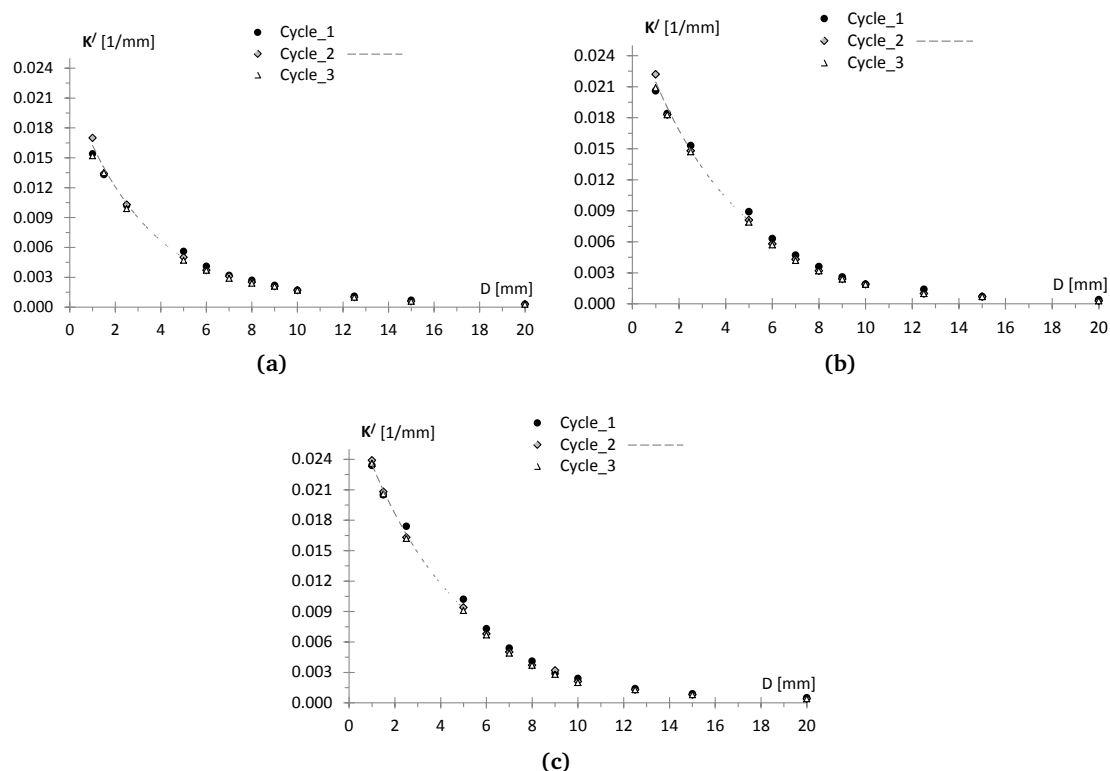
Le sfere d'acciaio che compongono il dispositivo RBRL, al passare del tempo, si "infossano" sempre più all'interno dei cuscinetti in gomma, adagiandosi in una sorta di conche (chiamate *pits*). Questo tipo di comportamento è dovuto alle caratteristiche meccanico-reologiche delle gomme, che sono materiali di tipo viscoelastico, come spiegato in precedenza. Risulta dunque evidente che le sfere d'acciaio, all'arrivo del sisma, prima di poter rotolare liberamente sul tappeto in gomma, devono riuscire ad evadere da questi *pits* vincendo un picco di forza iniziale che inneschi il loro movimento.

Questo picco di forza può essere potenzialmente un problema per il sistema di isolamento. Se questo valore continuasse ad aumentare al passare del tempo, esso potrebbe essere talmente elevato che l'eccitazione sismica non sarebbe sufficiente a vincerlo inibendo il funzionamento dell'isolatore, che si comporterebbe invece come una sorta di incastro alla base trasmettendo praticamente la totalità dell'azione sismica all'oggetto da salvaguardare.

Dunque invece di proteggere l'oggetto isolato, la sua presenza potrebbe risultare addirittura sfavorevole.

#### 4.9.3.1 Andamento di $K'$ per i diversi tempi di stazionamento studiati

In questo sottoparagrafo si riportano gli andamenti del parametro  $K'$  per tre diversi casi sperimentali esaminati ovvero AA\_6b\_6h, AA\_6b\_10h e AA\_6b\_96h, illustrando in grafici separati le tre prove considerate per tutti e tre i cicli esaminati, per dare uno sguardo complessivo al fenomeno.



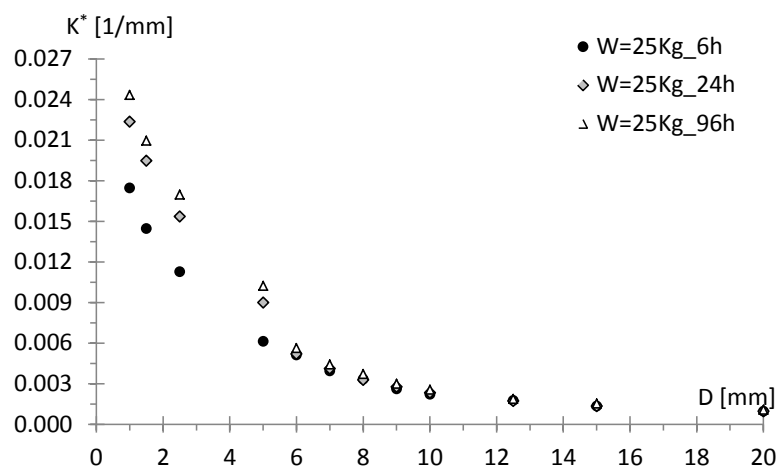
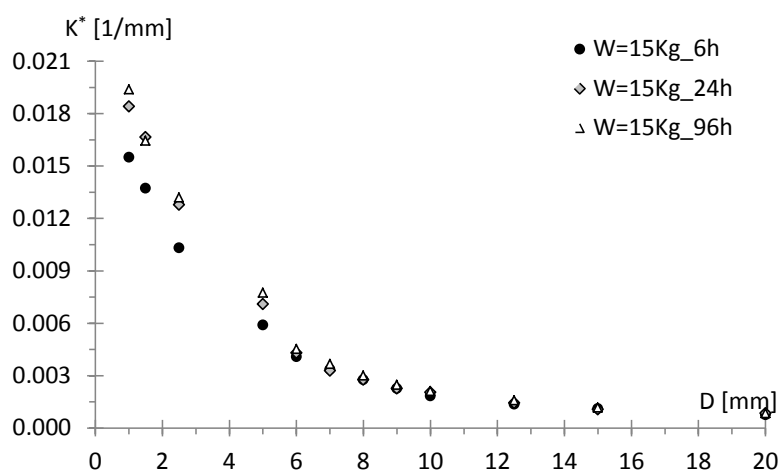
**Figura 4.31.** Confronti parametro  $K'$  per diversi tempi di stazionamento: (a) AA\_6b\_6h, (b) AA\_6b\_10h e (c) AA\_6b\_96h

Dai tre grafici riportati in Fig. 4.31, i quali sono stati volutamente presentati con la stessa scala sull'asse delle ordinate, si può osservare come il parametro  $K'$  subisca un aumento, nella zona dei piccoli spostamenti, il quale incrementa all'aumentare del tempo di stazionamento del carico.

Nei paragrafi successivi i dati raccolti verranno confrontati in grafici che evidenziano ancora meglio queste differenze, utilizzando anche scale diverse (logaritmiche).

#### 4.9.3.2 Confronti per $K^*$ e $\delta$

Di seguito si riportano dei grafici che illustrano l'andamento dei parametri dinamici delle gomme per i diversi tempi di stazionamento esaminati (in legenda sono rappresentate le serie indicanti il carico specifico per sfera in acciaio, ed il tempo di stazionamento corrispondente).

Figura 4.32. Confronti parametro  $K^*$  per 6 sfere, ciclo 2 a v63Figura 4.33. Confronti parametro  $K^*$  per 10 sfere, ciclo 2 a v63

Osservando le due figure precedenti ci si può rendere conto del fatto che il picco di rigidezza iniziale sembra aumentare al crescere del tempo di stazionamento del carico sul tappetino in gomma. I valori poi tendono a coincidere per le ampiezze di test maggiori. Questo fatto può essere spiegato pensando che, al passare del tempo di stazionamento, le sfere affondino sempre più all'interno dello strato gommoso, richiedendo valori di forza superiori per poter evadere da questi *pits*.

I valori di  $K^*$  ottenuti in per il caso a 6 sfere (Fig. 4.32) sono superiori a quelli ottenuti per la prova a 10 sfere (Fig. 4.33), ciò è imputabile al fatto che il carico agente su ogni sfera

risulta superiore utilizzando un numero minore di sfere, dunque essendo maggiore il carico specifico sarà maggiore anche l'affondamento della sfera all'interno del cuscinetto in gomma.

I grafici riportati di seguito mostrano invece le differenze riguardanti il parametro  $\delta$ :

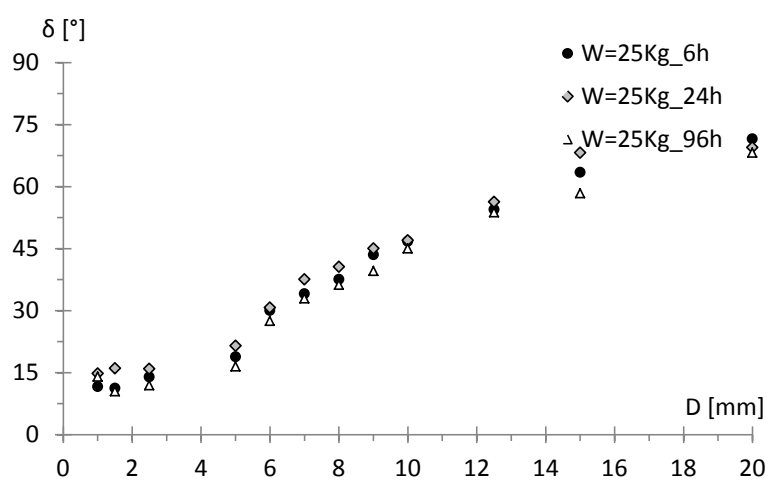


Figura 4.34. Confronti parametro  $\delta$  per 6 sfere, ciclo 2 a v63

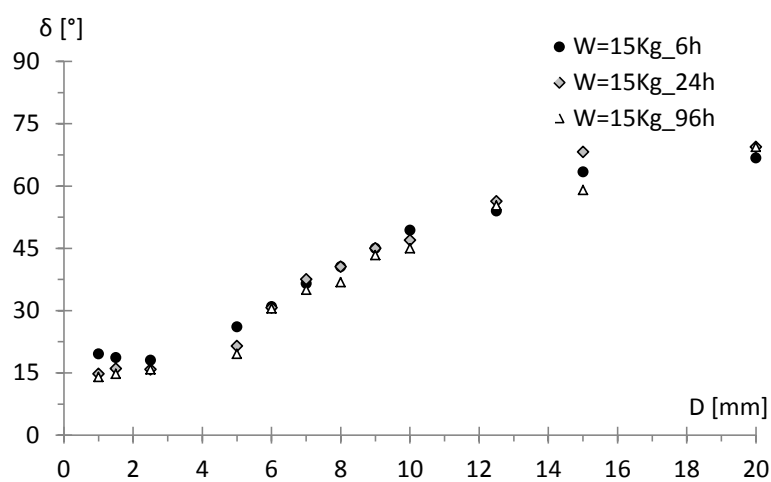


Figura 4.35. Confronti parametro  $\delta$  per 6 sfere, ciclo 2 a v63

Il parametro  $\delta$  non subisce variazioni evidenti tra i vari casi considerati, ed ha un andamento crescente che può essere spiegato seguendo lo stesso ragionamento condotto nel commento della figura 2.1 a pagina 69.

## 4.9.3.3 6 sfere in acciaio

Studiando il comportamento della gomma AA per diversi valori del parametro di stress  $W^*$ , e per i diversi tempi di stazionamento considerati nelle prove (6h, 24h, 96h) in un grafico di tipo logaritmico (nel tempo), si può notare che il parametro  $K'$  sembra variare seguendo un andamento pressoché lineare nel logaritmo del tempo (figura 4.36). Questo comportamento era già stato evidenziato nella sperimentazione di Muhr (Muhr, Sulong e Thomas, 1997) ed in questo caso è stato nuovamente confermato. I valori numerici calcolati sono stati riportati in Tabella 4.7 per il caso a 6 sfere di acciaio.

	t	$K'$	$K''$	$K^*$	$\delta$
Ampl	[h]	[1/mm]	[1/mm]	[1/mm]	[°]
<b>1mm</b>	6	0.017	0.003	0.017	9.35
	24	0.022	0.003	0.022	7.44
	96	0.024	0.004	0.024	8.80
<b>1.5mm</b>	6	0.013	0.003	0.014	12.62
	24	0.018	0.003	0.019	10.22
	96	0.021	0.003	0.021	8.75
<b>2.5mm</b>	6	0.010	0.003	0.011	16.24
	24	0.015	0.003	0.015	12.20
	96	0.016	0.003	0.017	10.77
<b>5mm</b>	6	0.005	0.003	0.006	26.57
	24	0.008	0.003	0.009	17.80
	96	0.009	0.003	0.010	15.46

**Tabella 4.7.** Confronto tra tempi di stazionamento diversi (6 sfere metalliche)

Per ogni serie sono stati considerati i parametri dinamici delle gomme per un certo valore di spostamento e per un certo tempo di stazionamento (Tab. 4.7). Si nota che tutti i valori sono inferiori a 5 mm, valore frontiera che rappresenta il limite tra comportamento nel *pit* e fuori dal *pit*.



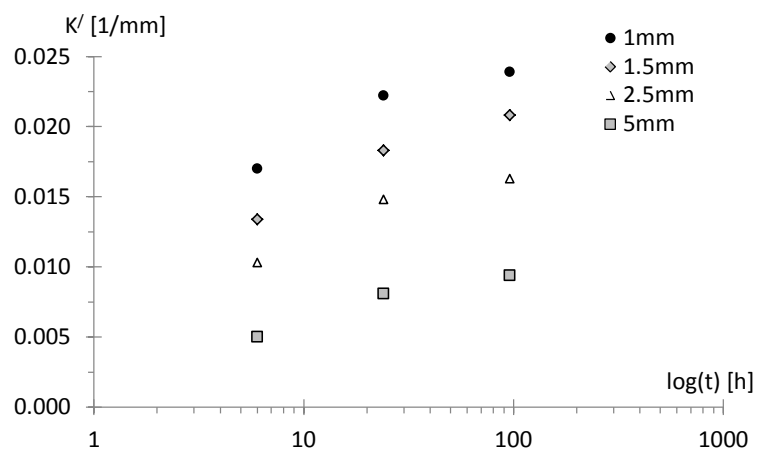


Figura 4.36. Effetti del tempo di stazionamento sulla rigidità, 6 sfere, 2° ciclo a v31

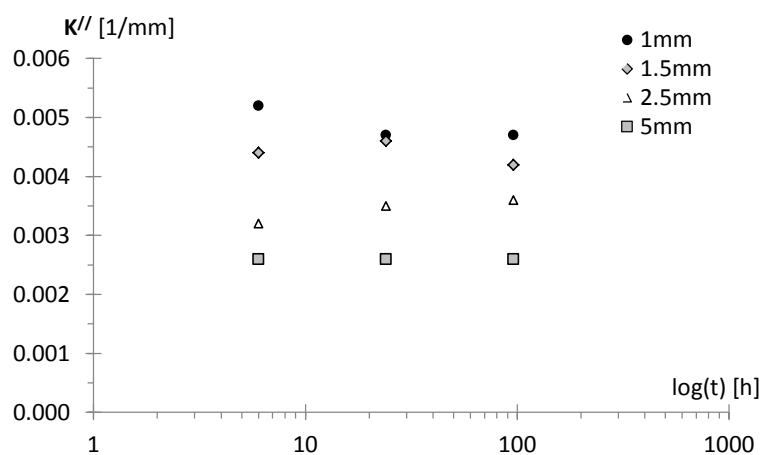


Figura 4.37. Influenza del tempo di stazionamento sul valore di  $K''$ , 6 sfere, 2° ciclo a v31

La figura 4.37 invece mostra come il valore di  $K''$  non risenta più di tanto del diverso tempo di stazionamento al quale è stato sottoposto il dispositivo, difatti i punti rappresentanti i diversi tempi seguono un andamento pressoché costante dal punto di vista reologico. Dunque si può pensare che la dissipazione energetica offerta dalla gomma sia indipendente dal tempo di stazionamento del carico.

## 4.9.3.4 10 sfere in acciaio

Di seguito si riportano gli stessi grafici, riferiti però al ciclo 2 per v63, nel caso a 10 sfere in acciaio, per evidenziare possibili differenze nel comportamento.

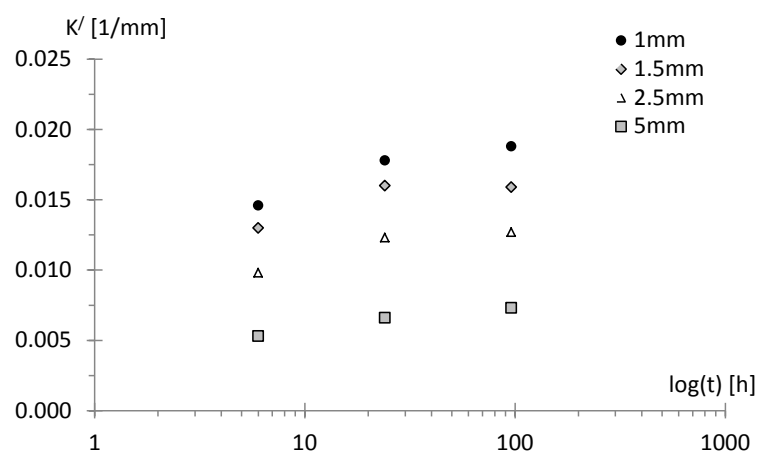


Figura 4.38. Influenza del tempo di stazionamento sul valore di  $K'$ , 10 sfere, 2° ciclo a v63

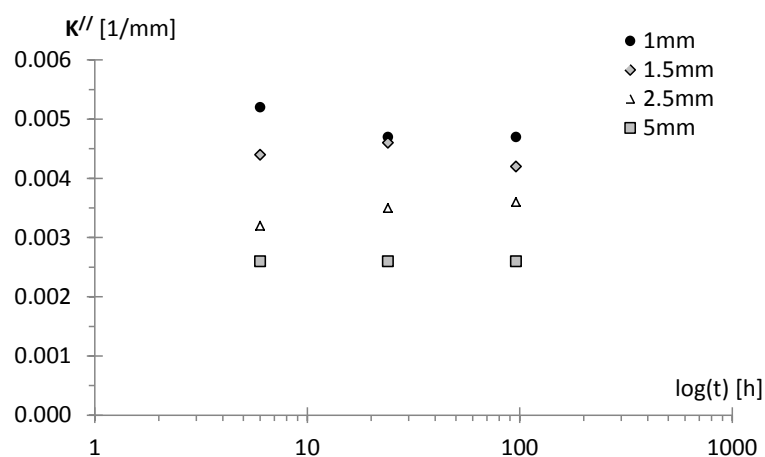


Figura 4.39. Influenza del tempo di stazionamento sul valore di  $K''$ , 10 sfere, 2° ciclo a v63

Anche in questo caso, i ragionamenti fatti in precedenza possono essere ritenuti validi. Gli andamenti che si osservano nelle Figure 4.38 e 4.39 infatti, sono assimilabili a quelli ottenuti nel caso precedente, sono dunque di ulteriore supporto alle precedenti conclusioni.

#### 4.9.4 Confronti tra gomme (tempo di stazionamento 24h)

In questo paragrafo si vanno a confrontare tra loro vari tipi di gomma utilizzati nelle varie prove sperimentali. L'unico tempo di stazionamento comune a tutti i test sperimentali effettuati è quello a 24h, il quale è stato scelto per confrontare i parametri dinamici delle gomme e per stabilire quale sia la migliore gomma da utilizzare ai fini dell'isolamento sismico col dispositivo RBRL. I confronti sono stati eseguiti a v31 e a v63, per entrambi è stato utilizzato il ciclo 2.

Di seguito si riporta per comodità la figura che illustra il diverso uso degli strati gommosi nelle varie configurazioni.

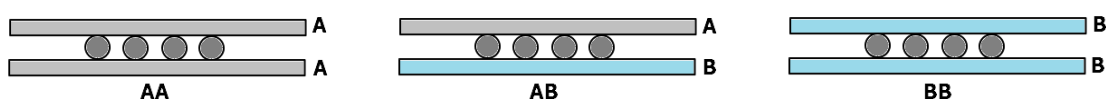


Figura 4.40. Configurazione delle gomme utilizzata per i vari test sperimentali

La prima configurazione prevede l'utilizzo di un doppio tappeto di gomma di tipo A (gomma più rigida rispetto alla gomma B dal punto di vista meccanico). La seconda configurazione è ibrida, ovvero vengono utilizzati due strati di gomma differente accoppiando A e B, invece l'ultimo caso presenta una coppia di tappetini di tipo B.

##### 4.9.4.1 Confronti a v31

Si riporta innanzitutto un grafico (Fig. 4.41) che illustra la differenza tra le gomme per il parametro  $K'$ , considerando il ciclo 2 della prova effettuata a v31 e con un carico per ogni sfera in acciaio pari a 25 kg.

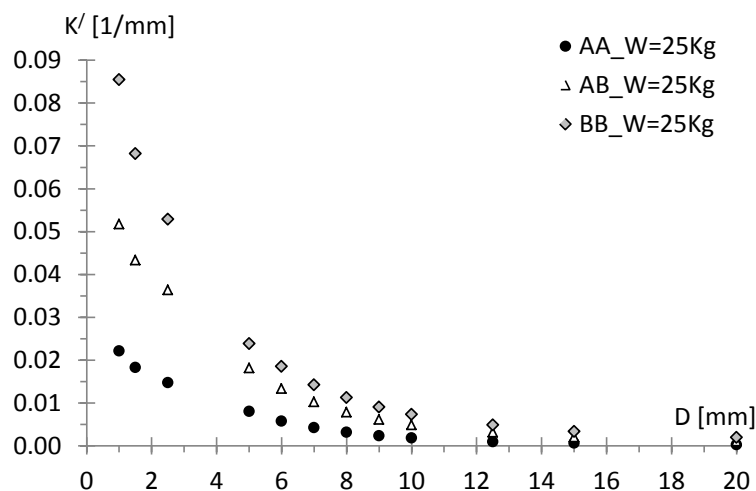


Figura 4.41. Confronti per il parametro  $K'$ , prova a v31, ciclo 2

Si osserva che la gomma di tipo B presenta valori del parametro  $K'$  decisamente maggiori rispetto alla gomma A, mostrando dei picchi di rigidità notevoli, soprattutto per le ampiezze minori (*small amplitudes*).

La serie che rappresenta la configurazione ibrida AB invece si dispone tra AA e BB, mostrando caratteristiche intermedie, come si poteva immaginare.

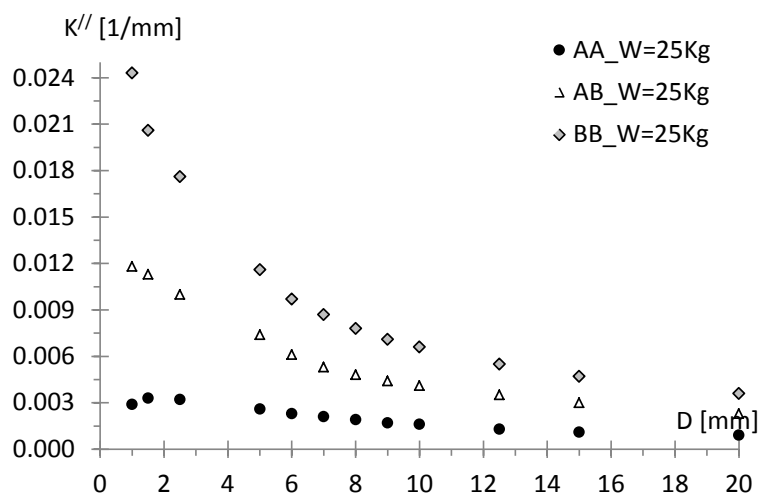
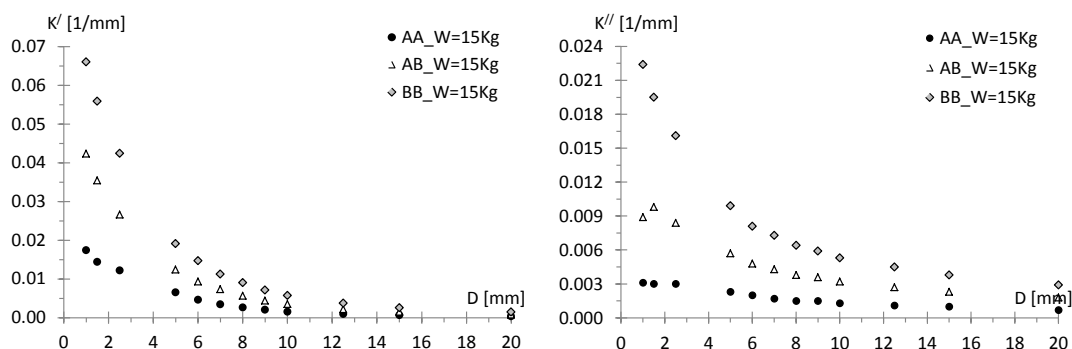


Figura 4.42. Confronti per il parametro  $K''$ , prova a v31, ciclo 2

La Fig. 4.42 invece, mostra le differenze tra le gomme in termini del parametro  $K''$ . Si può notare che la gomma di tipo B sembra offrire maggiore dissipazione della gomma A,

ricordando che il parametro  $K''$  rappresenta l'area racchiusa in un ciclo isteretico.



**Figura 4.43.** Confronti per il parametro  $K'$  e  $K''$ , prova a v31, ciclo 2, 10 sfere in acciaio

La figura precedente mostra gli stessi grafici ottenuti però considerando le prove a v31 con 10 sfere in acciaio, dunque con 15 kg di carico gravante su ogni sfera in acciaio.

Come si può notare, l'andamento ottenuto per i due parametri dinamici rispecchia quello del caso a 6 palle, mostrando però una riduzione dei due valori, derivante dal minor carico specifico per sfera.

#### 4.9.4.2 Confronti a v63

Di seguito si riportano i confronti eseguiti tra le prove a tempo di stazionamento 24h, questa volta considerando però i test condotti a  $v=63\text{mm/s}$ . I due grafici riportati in seguito (Figure 4.44 e 4.45) mostrano l'andamento del parametro  $K'$  e di  $K''$  per le prove effettuate a v63 per il secondo ciclo, e utilizzando 6 sfere in acciaio, ovvero con un carico specifico pari a 25 Kg.

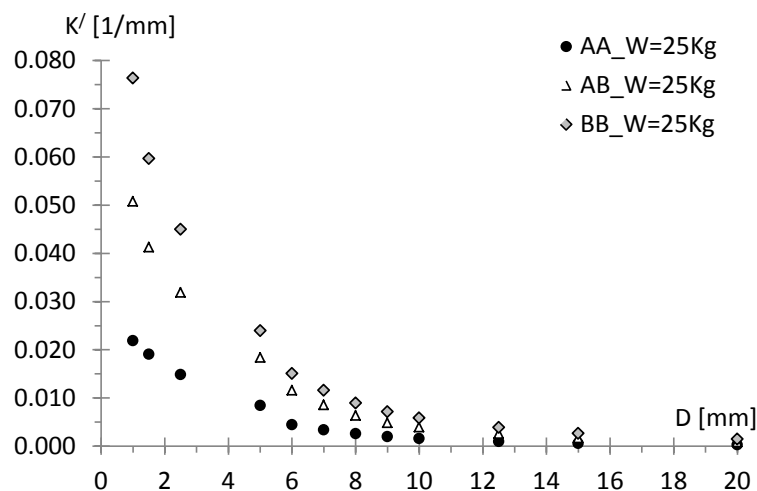


Figura 4.44. Confronti per il parametro  $K'$ , prova a v63, ciclo 2, 6 sfere in acciaio

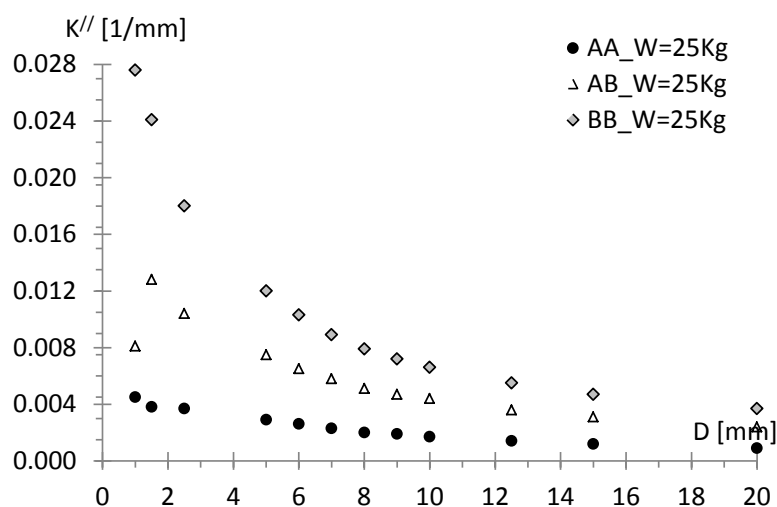


Figura 4.45. Confronti per il parametro  $K''$ , prova a v63, ciclo 2, 6 sfere in acciaio

Anche in questo caso la gomma di tipo BB, più morbida, presenta elevati picchi di rigidità, ma anche uno smorzamento maggiore, sintetizzato dal parametro  $K''$ . La gomma AA, più dura, presenta invece rigidità iniziali inferiori ma anche una dissipazione energetica meno rilevante.

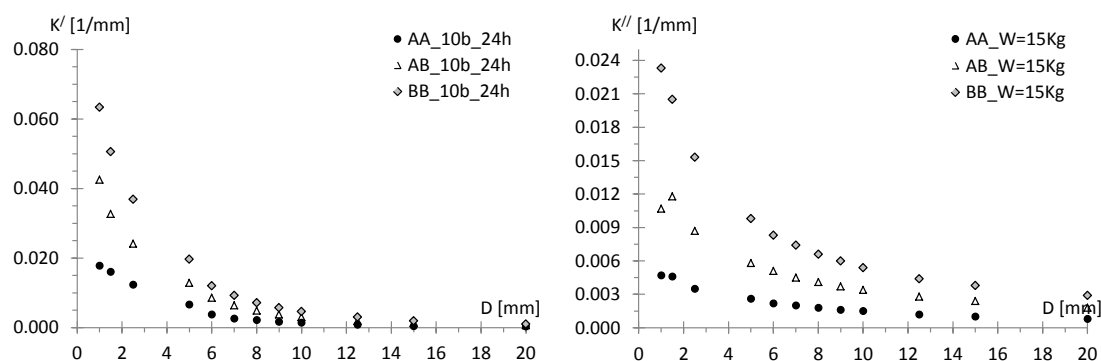


Figura 4.46. Confronti per il parametro  $K'$  e  $K''$ , prova a v63, ciclo 2, 10 sfere in acciaio

Anche per le prove eseguite impiegando 10 sfere in acciaio, dunque riducendo il carico specifico da 25 a 15 kg si osservano gli stessi andamenti del caso precedente, ovvero un incremento notevole della rigidità si picco al passaggio da gomma AA a gomma BB, con il caso ibrido AB posizionato al centro.

A primo impatto sembrerebbe che la gomma di tipo B sia più efficiente in termini dissipativi e dunque più adatta per l'utilizzo in un dispositivo di isolamento sismico come il RBRL. Risulta allora conveniente esaminare le differenze tra le due gomme in termini di smorzamento  $\xi$ , parametro di immediata interpretazione dal punto di vista ingegneristico, usato infatti anche dalle Normative per ottenere gli spettri sismici di progetto.

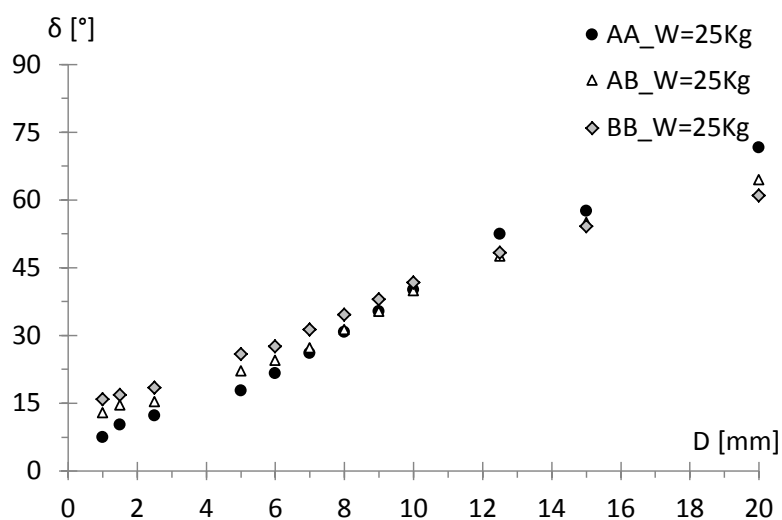


Figura 4.47. Andamento del parametro  $\delta$

A questo proposito ben si presta l'utilizzo del parametro  $\delta$ , in quanto permette di ragionare in termini del fattore  $\xi$ :

$$\xi \approx \frac{1}{2} \tan \delta$$

Osservando il grafico di Figura 4.47, si può notare che in termini di  $\delta$ , e dunque di  $\xi$  le due gomme considerate siano pressoché equivalenti.

Infatti se è vero che la gomma di tipo B è più dissipativa rispetto alla gomma di tipo A, è vero anche che per poter dissipare quella quantità di energia occorre opporsi ad una maggiore rigidità, espressa appunto dal parametro  $K'$ . Ai fini di abbattimento delle ordinate dello spettro le due gomme possono essere considerate circa uguali.

Perciò, dovendo il dispositivo RBRL proteggere la struttura isolata anche in caso di vibrazioni o sismi leggeri, è preferibile dotarlo di una bassa rigidità iniziale, per far sì che il rotolamento delle sfere inizi con una forza non troppo elevata. Altrimenti tale dispositivo si comporterebbe a tutti gli effetti come un vincolo per la struttura, una sorta di incastro addirittura, trasferendo all'oggetto da proteggere l'intera forza sismica alla quale è soggetta la base di appoggio.





---

## CAPITOLO 5

### PROPOSTA DI UNA PROCEDURA DI PROGETTAZIONE

---

In questo capitolo verrà presentata un'idea per una procedura di progettazione abbastanza rapida e standardizzata per un sistema di isolamento che sfrutta un dispositivo RBRL. Verranno pertanto combinati la teoria ed i risultati ottenuti da alcuni *papers* internazionali, assieme alla calibrazione di alcune nuove leggi sperimentali (Donà, 2015) così da produrre una serie di abachi utili alla progettazione.

Nella parte di progettazione si considerano delle leggi che valgono per un rotolamento di tipo stazionario. Le ampiezze di oscillazione del sistema si considerano abbastanza elevate da poter trascurare gli effetti indotti dal fenomeno dell'*indentation* considerato al paragrafo precedente. In questo caso si assume che i parametri siano infatti *indipendenti* dalla velocità, al contrario di quanto accade all'interno del *pit*, o comunque nelle immediate vicinanze per effetto dei fenomeni locali.

Per progettare un sistema di isolamento usando un dispositivo di tipo RBRL si devono innanzitutto decidere i valori di periodo ( $T$ ) e smorzamento ( $\xi$ ) da assegnare alla struttura isolata così come per ogni tipo di dispositivo di isolamento presente sul mercato.

Nella figura 5.1 sono rappresentati i vari spettri di progetto secondo Eurocodice 8 per differenti valori di smorzamento  $\xi$ :

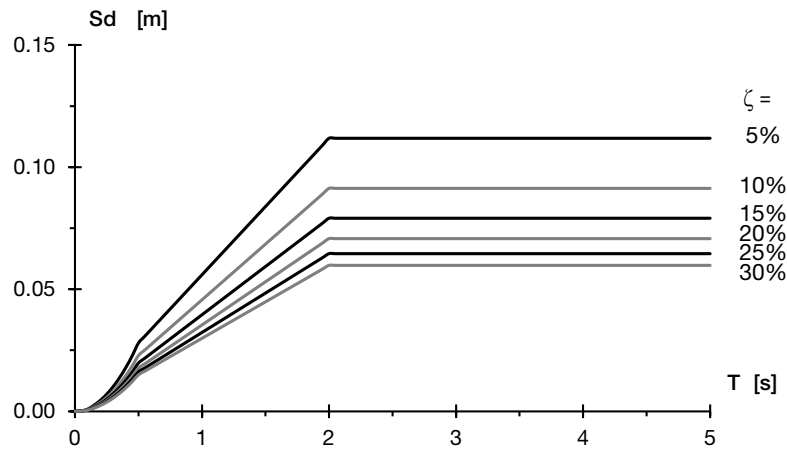


Figura 5.1. Spettro in spostamento da EC8

Lo spettro considerato è di tipo 1 prevedendo un suolo di tipo B ed un'accelerazione di *bedrock* di 0.15g. Per ulteriori approfondimenti riguardo lo spettro ottenuto si rimanda all'Appendice A. Noto lo spettro elastico in spostamento, mediante l'impiego del fattore  $R_\xi$  si determina lo spettro in spostamento per qualsiasi valore di  $\xi$  voluto:

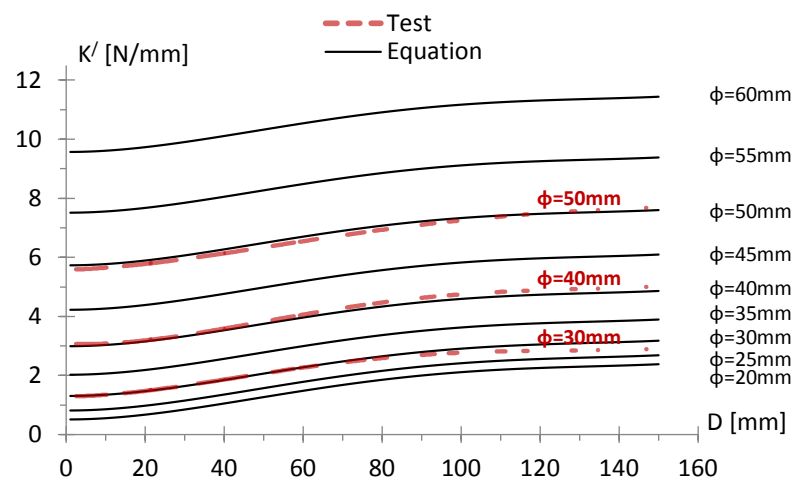
$$R_{\xi_0} = (0.10 / (0.05 + \xi))^{0.5}$$

Da questo spettro (figura 5.1) poi si determina il legame tra  $T$ ,  $\xi$  e  $D$  (spostamento di progetto).

successivamente, conoscendo la massa  $M$  dell'oggetto che deve essere isolato, si calcola la rigidezza  $K$  da attribuire all'isolatore mediante la nota espressione:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}}$$

Noti questi parametri, utilizzando l'abaco fornito in figura 5.2, il quale esprime una relazione tra diametro delle molle cilindriche e rigidezza della molla, si può determinare il diametro delle molle (oppure una combinazione di diametri più piccoli) necessario al fine di ottenere la rigidezza di progetto richiesta.

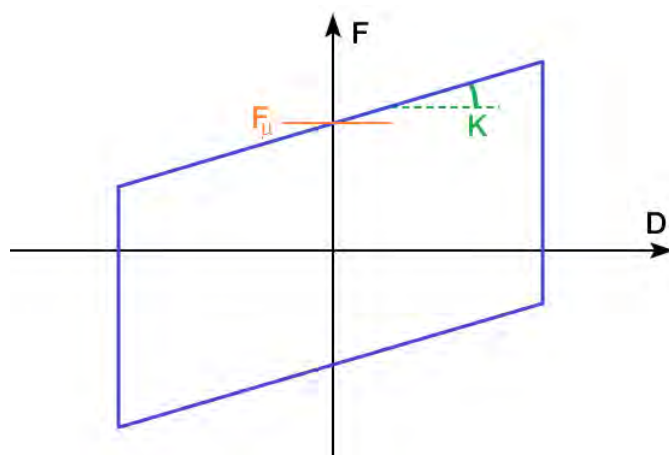


**Figura 5.2.** Abaco che lega K, D e diametro delle molle (Donà, 2015)

Si può inoltre calcolare il valore del coefficiente di attrito  $\mu$  utilizzando l'equazione (Muhr, Sulong e Thomas, 1997):

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{M \cdot g} = \frac{1}{g} \cdot \frac{2\pi^3 D \xi}{T^2 (1 - \pi \xi/2)}$$

Utilizzando le formule sopra indicate, non si va a fare altro che a definire un ciclo isteretico come quello illustrato in Figura 5.1. L'area racchiusa dal ciclo rappresenta l'energia dissipata dall'isolatore, mentre la pendenza con la quale salgono le curve è determinata dalla rigidezza laterale data dalle molle cilindriche.  $F_{\mu}$  rappresenta la forza di attrito per rotolamento di tipo stazionario.



**Tabella 5.1.** Ciclo considerato per la progettazione

L'area  $A$  del ciclo isteretico può essere calcolata come:

$$A = 2F_{\mu} \cdot 2d$$

dove  $d$  rappresenta l'ampiezza di spostamento, assumendo che la rigidezza effettiva della sfera all'interno del *pit* sia infinita (Muhr, Sulong e Thomas, 1997). Il *loss angle* può essere calcolato utilizzando la seguente equazione:

$$\sin \delta = \frac{A}{\pi(Kd + F_{\mu})d} = \frac{4F_{\mu}}{\pi(Kd + F_{\mu})}$$

Il rapporto di smorzamento è legato a  $\delta$  dalla:  $\xi \approx 1/2 \tan \delta$ . Dunque riarrangiando le formule appena presentate si può calcolare il valore del coefficiente di attrito secondo la formula presentata alla pagina precedente.

Dunque si possono raccogliere in una tabella i parametri in ingresso e quelli in uscita per progettare il dispositivo secondo la procedura pensata in questo lavoro, che raccoglie e rimaneggia gli spunti provenienti da vari papers.

Input		Output
PARAMETRI NOTI:		
M		K
Spettro di progetto		$\mu$
PARAMETRI FISSATI:		
$T_{isol}$		
$\xi$		

**Tabella 5.2.** Parametri in input e output per progettare il dispositivo

Infine, deciso il tipo di gomma ed il suo spessore  $t$ , si possono determinare il diametro e il numero di palle adeguato perchè il valore  $W^*$  ( $W/ER^2$  - parametro di stress) non sia troppo elevato al fine di non danneggiare il tappeto gommoso utilizzando l'abaco di tabella 5.3.

## 5. PROPOSTA DI UNA PROCEDURA DI PROGETTAZIONE

ABACHI PER LA PROGETTAZIONE DISPOSITIVO RBRL											
stress parameter											
0.6		0.8		1		1.2		1.4		1.6	
$\mu$	t/R	$\mu$	t/R	$\mu$	t/R	$\mu$	t/R	$\mu$	t/R	$\mu$	t/R
0.008	0.089	0.009	0.098	0.01	0.11	0.011	0.115	0.012	0.121	0.013	0.126
0.009	0.128	0.01	0.135	0.011	0.14	0.012	0.150	0.013	0.154	0.014	0.157
0.01	0.176	0.011	0.180	0.012	0.19	0.013	0.191	0.014	0.193	0.015	0.194
0.011	0.235	0.012	0.235	0.013	0.24	0.014	0.239	0.015	0.239	0.016	0.236
0.012	0.307	0.013	0.301	0.014	0.30	0.015	0.295	0.016	0.291	0.017	0.284
0.013	0.393	0.014	0.377	0.015	0.37	0.016	0.360	0.017	0.350	0.018	0.338
0.014	0.494	0.015	0.467	0.016	0.45	0.017	0.433	0.018	0.417	0.019	0.399
0.015	0.612	0.016	0.570	0.017	0.54	0.018	0.517	0.019	0.492	0.02	0.467
0.016	0.751	0.017	0.690	0.018	0.65	0.019	0.611	0.02	0.577	0.021	0.543
0.017	0.910	0.018	0.826	0.019	0.77	0.02	0.717	0.021	0.671	0.022	0.627
0	0.000	0.019	0.981	0.02	0.90	0.021	0.835	0.022	0.776	0.023	0.719
0	0.000	0	0.000	0.021	1.05	0.022	0.968	0.023	0.892	0.024	0.822
0	0.000	0	0.000	0	0.00	0.023	1.116	0.024	1.021	0.025	0.934
0	0.000	0	0.000	0	0.00	0	0.000	0	0.000	0.026	1.057

Tabella 5.3. Abaco che lega  $\mu$  a t/R

Per terremoti più piccoli di quello di progetto non si può utilizzare il ciclo di isteresi idealizzato per calcolare la rigidezza. Infatti, se l'eccitazione sismica risultasse insufficiente per vincere la forza di *roll-out* di picco, il comportamento del sistema sarebbe governato dall'effettiva rigidezza dinamica delle sfere giacenti nelle loro depressioni.

Considerando per esempio un'accelerazione di *bedrock* di 0.15g ed uno smorzamento  $\xi = 5\%$  ottengo dallo spettro:

$T_c$ [s]	$D_c$ [m]	Suolo
2	0.112	B

Si ipotizzi di dover proteggere sismicamente un oggetto di massa 1200 Kg e di voler ottenere i seguenti obiettivi prestazionali:

$\xi$	0.2
T [s]	3

Utilizzando l'abaco di tabella 5.4 (ottenuto sfruttando le equazioni sopracitate per varie combinazioni di masse, smorzamenti e periodi), si possono determinare la rigidezza e il coefficiente d'attrito di cui deve essere dotato il dispositivo. I valori necessari sono stati evidenziati in rosso.

In figura 5.3 è stato poi evidenziato il punto corrispondente al dispositivo in questione, e da qui si effettua la scelta del diametro delle molle in grado di fornire la rigidezza necessaria. In questo caso risulta essere perfetta una molla di diametro  $\phi = 45 \text{ mm}$ . Oppure l'obiettivo può essere raggiunto mediante la combinazione di molle più piccole.

D corner = 112 mm					
SUOLO B - ag = 0.15 g					
M [ton]	$\zeta$ smorz	T [s]	D displ [mm]	K rigid [N/mm]	$\mu$ attr
0.3	0.1	1	45.72	11.84	0.034
0.3	0.1	2	91.45	2.96	0.017
0.3	0.1	3	91.45	1.32	0.008
0.3	0.1	4	91.45	0.74	0.004
0.3	0.2	1	35.42	11.84	0.065
0.3	0.2	2	70.84	2.96	0.033
0.3	0.2	3	70.84	1.32	0.015
0.3	0.2	4	70.84	0.74	0.008
0.3	0.3	1	29.93	11.84	0.107
0.3	0.3	2	59.87	2.96	0.054
0.3	0.3	3	59.87	1.32	0.024
0.3	0.3	4	59.87	0.74	0.013
0.6	0.1	1	45.72	23.69	0.034
0.6	0.1	2	91.45	5.92	0.017
0.6	0.1	3	91.45	2.63	0.008
0.6	0.1	4	91.45	1.48	0.004
0.6	0.2	1	35.42	23.69	0.065
0.6	0.2	2	70.84	5.92	0.033
0.6	0.2	3	70.84	2.63	0.015
0.6	0.2	4	70.84	1.48	0.008
0.6	0.3	1	29.93	23.69	0.107
0.6	0.3	2	59.87	5.92	0.054
0.6	0.3	3	59.87	2.63	0.024
0.6	0.3	4	59.87	1.48	0.013
1.2	0.1	1	45.72	47.37	0.034
1.2	0.1	2	91.45	11.84	0.017
1.2	0.1	3	91.45	5.26	0.008
1.2	0.1	4	91.45	2.96	0.004
1.2	0.2	1	35.42	47.37	0.065
1.2	0.2	2	70.84	11.84	0.033
1.2	0.2	3	70.84	5.26	0.015
1.2	0.2	4	70.84	2.96	0.008
1.2	0.3	1	29.93	47.37	0.107
1.2	0.3	2	59.87	11.84	0.054
1.2	0.3	3	59.87	5.26	0.024
1.2	0.3	4	59.87	2.96	0.013

Tabella 5.4. Abaco per determinare K e  $\mu$  in funzione degli altri parametri

## 5. PROPOSTA DI UNA PROCEDURA DI PROGETTAZIONE

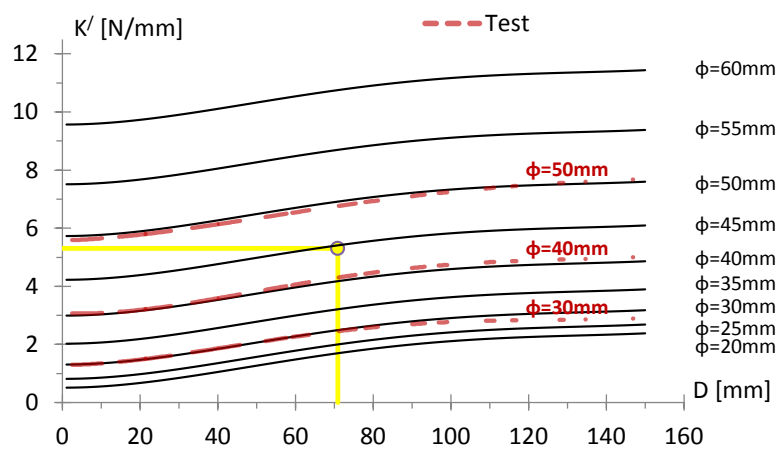


Figura 5.3. Scelta del diametro delle molle

Ora, scelto un parametro di stress (per esempio  $W^*=1$ ), in modo da mantenersi su valori non troppo elevati, entrando nell'abaco di Tabella 5.3 conoscendo il coefficiente  $\mu$  determinato in precedenza, può essere determinato il rapporto  $t/R$  di progetto, che in questo caso, per  $\mu = 0.015$  vale 0.37.

ABACHI PER LA PROGETTAZIONE DISPOSITIVO RBRL											
stress parameter											
0.6		0.8		1		1.2		1.4		1.6	
$\mu$	$t/R$	$\mu$	$t/R$	$\mu$	$t/R$	$\mu$	$t/R$	$\mu$	$t/R$	$\mu$	$t/R$
0.008	0.089	0.009	0.098	0.01	0.11	0.011	0.115	0.012	0.121	0.013	0.126
0.009	0.128	0.01	0.135	0.011	0.14	0.012	0.150	0.013	0.154	0.014	0.157
0.01	0.176	0.011	0.180	0.012	0.19	0.013	0.191	0.014	0.193	0.015	0.194
0.011	0.235	0.012	0.235	0.013	0.24	0.014	0.239	0.015	0.239	0.016	0.236
0.012	0.307	0.013	0.301	0.014	0.30	0.015	0.295	0.016	0.291	0.017	0.284
0.013	0.393	0.014	0.377	0.015	0.37	0.016	0.360	0.017	0.350	0.018	0.338
0.014	0.494	0.015	0.467	0.016	0.45	0.017	0.433	0.018	0.417	0.019	0.399
0.015	0.612	0.016	0.570	0.017	0.54	0.018	0.517	0.019	0.492	0.02	0.467
0.016	0.751	0.017	0.690	0.018	0.65	0.019	0.611	0.02	0.577	0.021	0.543
0.017	0.910	0.018	0.826	0.019	0.77	0.02	0.717	0.021	0.671	0.022	0.627
0	0.000	0.019	0.981	0.02	0.90	0.021	0.835	0.022	0.776	0.023	0.719
0	0.000	0	0.000	0.021	1.05	0.022	0.968	0.023	0.892	0.024	0.822
0	0.000	0	0.000	0	0.00	0.023	1.116	0.024	1.021	0.025	0.934
0	0.000	0	0.000	0	0.00	0	0.000	0	0.000	0.026	1.057

Figura 5.4. Scelta del valore di  $t/R$

Dunque utilizzando palle in acciaio con  $R=12.5$  mm si ottiene uno spessore del tappeto di gomma pari a 4.6 mm, che può essere dunque arrotondato a 5 mm.

Considerando una gomma con le seguenti caratteristiche meccaniche:



---

**Caratteristiche della gomma**


---

$G$	0.38 MPa
$E (= 3 \cdot G)$	1.14 MPa

---

si può calcolare il numero di palle d'acciaio necessario, scegliendo il valore del parametro di stress  $W^*$  (in questo caso posto uguale a 1) mediante la formula:

$$n_{sfere} = \frac{W_{tot}}{W^* \cdot ER^2} = 66$$

perciò in questo caso sono necessarie 66 sfere d'acciaio.

Considerando, per lo stesso oggetto da isolare, un parametro di stress più elevato ( $W^* = 1.4$ ) si ottengono invece i seguenti valori di progetto:

$t/R = 0.239$ , dunque utilizzando le stesse sfere del caso precedente e lo stesso composto per la gomma si ottiene uno spessore del tappetino pari a 3 mm. Il numero di palle totale in questo caso è invece 47.2, perciò si utilizzeranno 48 sfere in acciaio del diametro di 2.5 cm.

Nella tabella seguente si riassumono i risultati ottenuti per i due esempi studiati:

Risultati ottenuti			
	$t [mm]$	$N_{sfere}$	$\phi_{molle} [mm]$
<b>Esempio 1</b>	5	66	45
<b>Esempio 2</b>	3	48	45

---

---

# CAPITOLO 6

## MODELLAZIONE DEL DISPOSITIVO

---

In questo capitolo si presenta un esempio di modellazione del dispositivo, seguito da un caso studio di applicazione ad un oggetto reale, ovvero la statua della Temperanza, facente parte delle Arche Scaligere di Verona.

Per la modellazione di un dispositivo RBRL è stato scelto il software *Straus7* (v. 2.4.6). Nei paragrafi seguenti si riportano le scelte effettuate per la modellazione, e un breve riassunto della formulazione dal punto di vista computazionale degli elementi scelti dalla libreria del programma per creare il modello numerico.

### 6.1 Modello di Guerreiro

Una proposta di modello è stata elaborata a partire dai dati ottenuti dal progetto ECOEST (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007). Si è presentato un modello nel tempo, di tipo forza-spostamento 1D, chiamato per semplicità “modello di Guerreiro”.

Il modello (Fig. 6.1) consiste in una molla in gomma avente un piccolo grado di non-linearità (a) posta in parallelo con una forza di attrito (b), caratteristica del rotolamento in stato stazionario, e uno speciale comportamento per gli spostamenti dalla posizione iniziale in un intorno di 15 mm (c), per tenere in considerazione gli effetti locali dovuti al fenomeno dell'*indentation*, che si sviluppa per effetto del carico statico gravante sulle sfere.

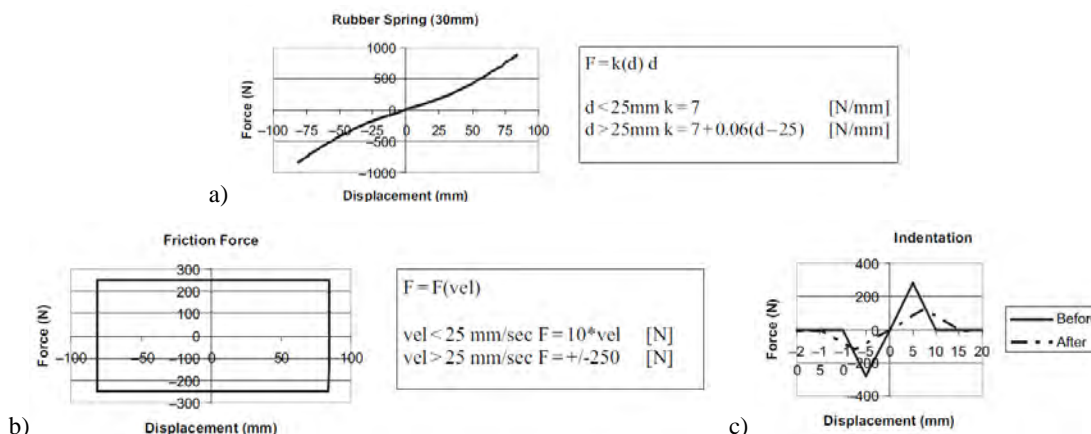


Figura 6.1. Modello proposto da Guerreiro (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007)

Tale modello fornisce una buona previsione della risposta del dispositivo per sismi di moderata e grande intensità, per i quali le sfere in acciaio riescono ad evadere dai loro *pits*. Non riesce però a cogliere al meglio il comportamento del dispositivo RBRL per i sismi di lieve entità, che tra l'altro sono quelli per i quali il dispositivo dovrebbe svolgere nel migliore dei modi la sua funzione. Per questo motivo è stato proposto un nuovo modello (Donà et al., 2014) per evitare il continuo aggiornamento dei parametri presente in quello di Guerreiro. Questo modello, più semplice dal punto di vista della programmazione, è stato rappresentato in figura 6.2. I tre comportamenti (molle ricentranti, *pit* e rotolamento in stato stazionario) sono infatti rappresentati indipendentemente l'uno dall'altro.

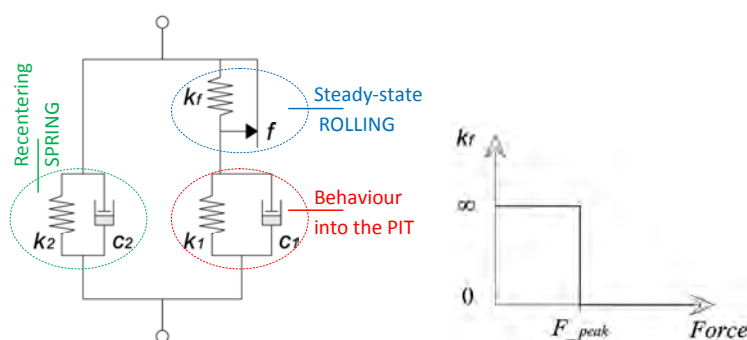


Figura 6.2. Modello alternativo (Donà et al., 2014)

Attraverso i dati raccolti dalla sperimentazione ECOEST e sfruttando i risultati ottenuti tramite il software OpenSees per una simulazione a “base incastrata”, si è inoltre dimostrato

come il dispositivo sia in grado di proteggere la struttura anche in presenza di sismi di lieve entità, con le sfere che oscillano all'interno delle conche create sul tappetino in gomma a causa del carico gravitazionale senza riuscire a vincere la forza di picco necessaria per iniziare il rotolamento di tipo stazionario al di fuori dei *pits*. La simulazione a base incastrata può rappresentare il comportamento di un isolatore a slitta, per il quale il sisma non sia stato abbastanza forte da provocarne l'innescio, dunque esso si comporta come un incastro a tutti gli effetti.

In questa tesi si è scelto di utilizzare per la modellazione un programma commerciale ad elementi finiti, quale *Straus7*, in modo da fornire una prima proposta di modello del dispositivo RBRL utilizzando *software* generici. Tale modello dunque necessiterà di futuri miglioramenti e approfondimenti, in particolare andrà implementata l'*indentation* iniziale, non considerata in questa prima analisi.

## 6.2 Modello del dispositivo

In una prima approssimazione, per capire come poter simulare il comportamento del dispositivo RBRL, è stato creato un modello elementare costituito da tre oggetti, come si può notare in Figura 6.3:

- Elemento *Spring-Damper*: molla di tipo non lineare (rosso)
- Elemento *Point-Contact Normal*: attrito secondo la legge di Coulomb (blu)
- Massa traslazionale concentrata puntiforme (verde)

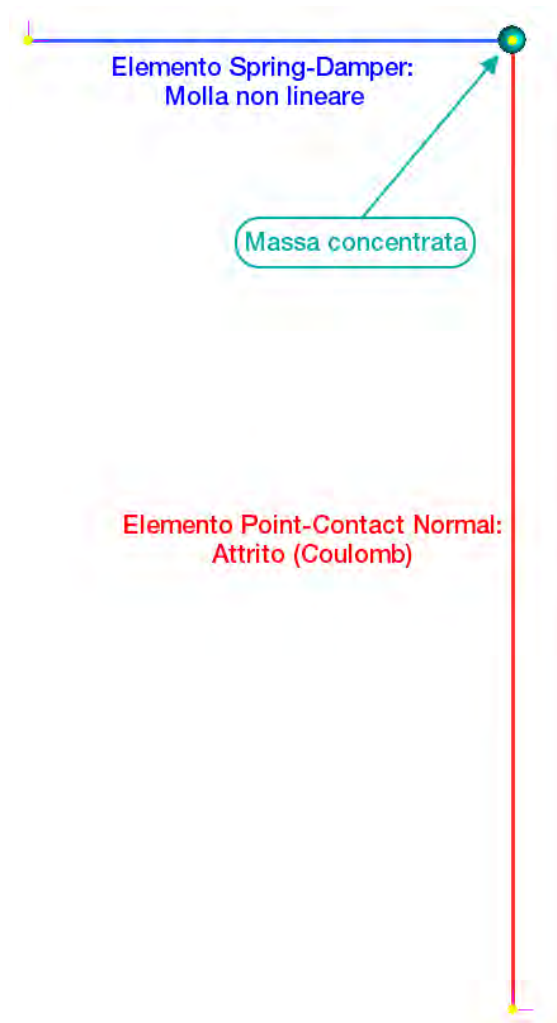


Figura 6.3. Schema del modello elementare

### 6.2.1 Elemento *Spring-Damper*, molla non lineare

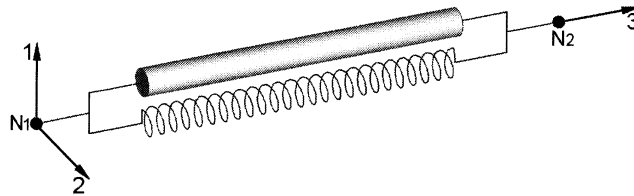
L'elemento evidenziato in rosso, una molla di tipo non lineare, rappresenta il contributo dovuto alla presenza delle molle ricentranti ai quattro lati del dispositivo.

L'elemento *spring-damper* è una combinazione tra una molla ed uno smorzatore (*dash-pot*). Con un'adeguata combinazione di parametri questo elemento può essere utilizzato per modellare una molla, uno smorzatore o un sistema *spring-damper* in parallelo.

Un elemento di questo tipo presenta una formulazione, in termini di matrice di rigidezza, che può portare le seguenti componenti di forza (gli assi principali dell'elemento sono illustrati

in Fig. 6.4):

1. Rigidezza assiale per resistere alle deformazioni dell'elemento in direzione assiale (asse 3);
2. Rigidezza tagliante per opporsi al movimento laterale delle due estremità secondo gli assi 1 e 2;
3. Rigidezza torsionale attorno alla direzione 3;



**Figura 6.4.** Assi principali di un elemento spring-damper (G+DComputing, 2004)

Le caratteristiche di rigidezza e di smorzamento dell'elemento sono definite tramite due diversi set di costanti:

1. Tre coefficienti di rigidezza  $K_a$ ,  $K_l$ ,  $K_t$ .
2. Tre coefficienti di smorzamento  $C_a$ ,  $C_l$ ,  $C_t$ .

I pedici  $a$ ,  $l$  e  $t$  rappresentano i termini: assiale, laterale e torsionale rispettivamente. I coefficienti di smorzamento sono rilevanti ai soli fini di un'analisi dinamica e sono ignorati dagli altri solutori del programma.

Le matrici di rigidezza e di smorzamento dell'elemento *spring-damper* sono indipendenti dalla geometria dell'elemento stesso (la lunghezza in questo caso). Ciò è diverso da un elemento *truss* ad esempio, dove la rigidezza assiale è inversamente proporzionale alla sua lunghezza.

Il vettore delle componenti di forza dell'elemento è calcolato dalla:

$$\mathbf{p}_e = \mathbf{K}_e \mathbf{d}_e$$

dove  $\mathbf{d}_e$  è il vettore degli spostamenti nodali. Per il caso lineare la matrice di rigidezza dell'elemento è la seguente:

$$\mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} K_l & 0 & 0 & 0 & -K_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_l & 0 & 0 & 0 & -K_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_a & 0 & 0 & 0 & -K_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_t & 0 & 0 & 0 & -K_t \\ -K_l & 0 & 0 & 0 & K_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_l & 0 & 0 & 0 & K_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_a & 0 & 0 & 0 & K_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_t & 0 & 0 & 0 & K_t \end{bmatrix}$$

In una *transient dynamic analysis*, il vettore delle forze relativo allo smorzamento si calcola mediante la:

$$\mathbf{p}_e^c = \mathbf{C}_e \dot{\mathbf{d}}_e$$

dove  $\dot{\mathbf{d}}_e$  è la derivata temporale di  $\mathbf{d}_e$ .

Una tabella Forza vs Spostamento può essere assegnata all'elemento per definirne il comportamento assiale, al posto di utilizzare il coefficiente di rigidezza assiale  $K_a$ , come è stato fatto per il caso studio in questione. La legge forza-spostamento di tipo non lineare è stata scelta in base alla proposta di Guerreiro (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007), ed è stata riportata graficamente in Figura 6.5.

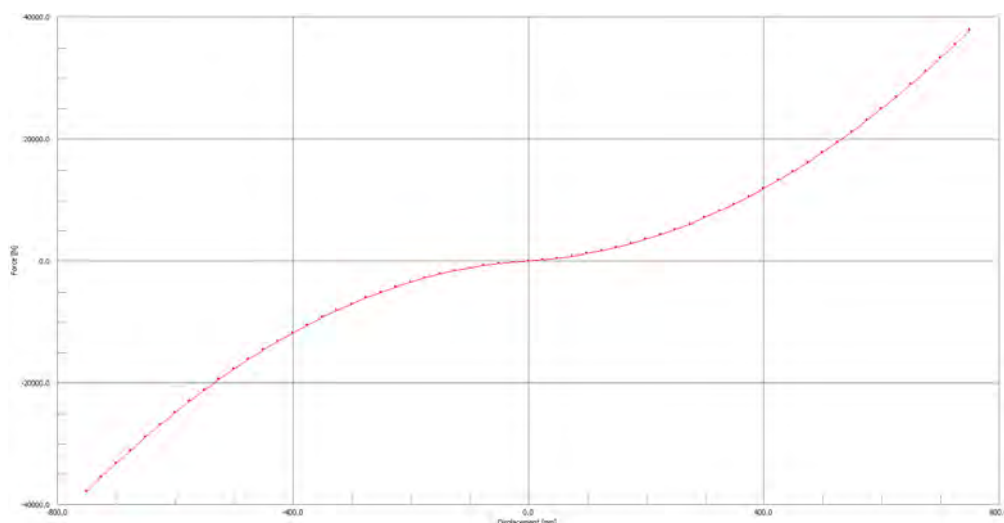


Figura 6.5. Molla non lineare

Dal punto di vista analitico tale legge, determinata per un cilindro in gomma di 30 mm di diametro, si esprime attraverso le equazioni:

$$F = k(d) \cdot d$$

$d < 25\text{mm}$	$k = 7$	$[\text{N/mm}]$
$d > 25\text{mm}$	$k = 7 + 0.06(d - 25)$	$[\text{N/mm}]$

Dunque tale molla presenta un ramo lineare iniziale, per poi mostrare un comportamento non lineare all'aumentare della deformazione.

Se assegnate, queste tabelle sono considerate solo nel caso di solutori di tipo non-lineare.

Il parametro di massa, per un elemento di questo tipo è rappresentato dalla sua massa totale e non può essere definito in termini di densità di massa, come nel caso di elementi beam e truss, essendo esso indipendente dalla sua lunghezza. La massa totale viene infatti divisa in parti uguali e applicata a tutte le componenti traslazionali dell'elemento, ad ognuno dei due nodi che lo definiscono. La massa inerziale di tipo torsionale non è considerata.



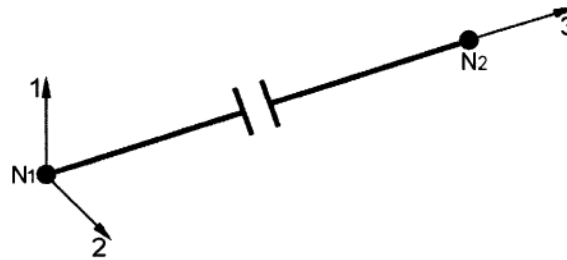
$$K_e = \frac{m}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

I due termini diagonali relativi alle rotazioni attorno all'asse 3 sono appunto nulli.

### 6.2.2 Elemento Point Contact Normal

Gli elementi *point contact* sono utilizzati per modellare *gap* o connessioni speciali tra due nodi in un'analisi non-lineare. Lo stato del contatto viene monitorato attraverso lo spostamento assiale relativo dei due nodi di estremità.

In figura 6.6 sono rappresentati gli assi principali di un elemento di tipo *point contact*.



**Figura 6.6.** Assi principali di un elemento point contact (G+DComputing, 2004)

*Straus7* offre quattro diverse tipologie di connessioni ovvero:

1. Normal contact - attivo solo in compressione, non ha rigidità assiale a trazione e possono essere assegnate costanti di attrito;
2. Zero gap - attivo solo quando il *gap* è chiuso, non ha rigidità assiale a trazione e possono essere assegnate costanti di attrito;

3. Tension contact - sempre attivo, ha limitata rigidità assiale e una rigidità laterale pari a quella assiale in compressione;
4. Takeup gap - resiste al moto sia in trazione che in compressione (non entrambe) e permette movimenti nella direzione opposta a quella resistente.

Type	Stiffness in Compression	Stiffness in Tension	Friction	When is it active?
Normal	Yes	No	Yes	When the element is in compression.
Zero gap	Yes	No	Yes	When the gap is closed.
Tension	Yes	Yes (with upper bound)	No friction, but lateral stiffness equals the axial stiffness.	When the element is in compression or the tension is less than the defined maximum allowable value.
Takeup	Yes, if set to compression	Yes, if set to tension	No	If set to compression, then resistance is in compressive direction. If set to tension, then resistance is in tensile direction.

**Tabella 6.1.** Caratteristiche principali degli elementi point contact (G+DComputing, 2004)

Ogni connessione presenta diverse formulazioni per rappresentare i diversi tipi di contatto tra nodi, si rimanda perciò al manuale del programma per ulteriori approfondimenti (G+DComputing, 2004). In questo caso è stato utilizzato il link di tipo 1 per modellare correttamente l'attrito presente tra le sfere in acciaio ed i tappetini in gomma.

Per un elemento di tipo *point contact normal* sono impostabili i seguenti parametri.

#### 6.2.2.1 Modellare il contatto

Si assume che quando due superfici entrano in contatto, esista uno strato fittizio di spessore nullo tra le superfici stesse. Fisicamente la modellazione di questo *layer* richiederebbe una rigidità infinita cosicché le due superfici non possano penetrarsi a vicenda; tutte le deformazioni circostanti all'area di contatto devono infatti avvenire all'interno del materiale di ogni superficie.

Quando si usa un elemento di contatto però, per modellare lo strato fittizio di rigidità infinita, tale elemento dovrebbe essere teoricamente dotato di una rigidità infinita per

soddisfare i requisiti di contatto senza penetrazione tra le superfici. Ciò implicherebbe uno spostamento relativo nullo tra i nodi di estremità dell'elemento di contatto utilizzato ( $\Delta L = 0$ ).

Numericamente tuttavia, uno spostamento non nullo tra i nodi è necessario per monitorare se le due superfici continuano ad essere effettivamente in contatto tra loro, in quanto la condizione  $\Delta L = 0$  è il punto di transizione tra le situazioni di contatto e non-contatto. Inoltre è numericamente impossibile utilizzare una rigidità infinita, e per calcolare la forza all'interno dell'elemento è necessario uno spostamento relativo dei nodi non nullo, perciò è richiesta una rigidità finita. In termini semplici, l'implementazione numerica di un problema di contatto tra superfici richiede una, seppur piccola, penetrazione. Il metodo utilizzato in questo caso è di tipo *penalty*, utilizzando un valore molto elevato di rigidità assiale per l'elemento in modo da indurre una piccolissima penetrazione tra le due superfici.

Tale penetrazione può essere espressa come  $0 > \frac{\Delta L}{L_0} \geq \varepsilon_p$  dove  $L_0$  è la lunghezza originale dell'elemento e  $\varepsilon_p$  è un parametro che controlla la massima penetrazione ammissibile, e può essere impostato all'interno del solutore (il range usuale varia da  $10^{-2}$  a  $10^{-6}$ ).

Siccome la rigidità deve essere un valore finito, essa deve essere settata su di un valore che possa assicurare la condizione di contatto e allo stesso tempo evitare problemi di tipo numerico. Se il valore risultasse troppo basso vi sarebbero grandi penetrazioni, se invece i valori fossero troppo elevati ci potrebbero essere problemi di stabilità durante l'analisi.

#### 6.2.2.2 Calcolo della forza

Quando le due superfici entrano in contatto, in presenza di un coefficiente di attrito non nullo  $C_i$ , lo spostamento relativo nella direzione  $i$  produce una forza laterale di attrito in tale direzione,  $F_i$ . Tale forza, tuttavia, presenta un limite superiore, se esso viene superato si dice che i due nodi stanno scivolando. In questo caso la forza laterale in ogni direzione sarà eguale al prodotto tra il coefficiente di attrito e la forza assiale presente nell'elemento.

Per differenti condizioni di contatto, le componenti di forza degli elementi sono calcolate come segue:

- Quando il gap è aperto (accade quando  $\Delta L \geq 0$ ):

$$F_a = 0 \quad \text{e} \quad F_1 = F_2 = 0$$

dove  $\Delta L$  è il cambiamento di lunghezza assiale dell'elemento e  $F_a, F_1, F_2$  sono le forze in direzione assiale, lungo la direzione laterale 1 e lungo la direzione laterale 2.

- Quando il gap è chiuso e non vi è scivolamento ( $\Delta L < 0$  con  $|k_i D_i| \leq |C_i F_a|$ ):

$$F_a = k_a \Delta L \quad \text{e} \quad F_1 = k_1 F_a \quad \text{e} \quad F_2 = k_2 F_a$$

dove  $k_a$  è il valore di rigidità assiale,  $D_i$  lo spostamento laterale dei due nodi di estremità ed i  $k_i$  sono i coefficienti di rigidità laterale. Il verso di  $F_i$  è opposto a quello dello spostamento relativo del nodo  $D_i$ .

- Quando il gap è chiuso e lo scivolamento si è attivato ( $\Delta L < 0$  con  $|k_i D_i| > |C_i F_a|$ ):

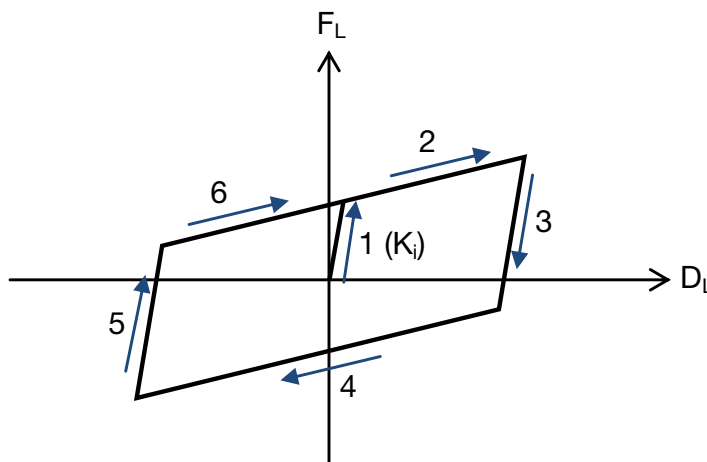
$$F_a = k_a \Delta L \quad \text{e} \quad F_1 = C_1 F_a \quad \text{e} \quad F_2 = C_2 F_a$$

La descrizione sopra riportata indica che le forze lungo le due direzioni principali vengono trattate separatamente e sono disaccoppiate, dunque l'attrito in una direzione non influenza l'attrito lungo l'altra.

Nel modello considerato è stata scelta l'opzione *Plastic Friction Model*, la quale, all'inversione del movimento di scivolamento, fa sì che la forza di attrito si riduca e cambi di segno non appena lo spostamento supera la piccola deformazione descritta dalla legge forza-spostamento. In questo tipo di modello può essere osservato un fenomeno di isteresi legato alla forza attritiva.

### 6.2.2.3 Rigidezza iniziale

La rigidezza iniziale con la quale cresce la curva forza spostamento a partire dalla posizione di riposo è collegata al valore di rigidezza assiale utilizzato dall'elemento per stimare la presenza di contatto mediante il fattore  $F_{sff}$ , chiamato *Contact Sticking Friction Factor*, ed è ottenuto mediante la relazione  $k_i = k_a \cdot F_{sff}$ . In Figura 6.7 è illustrato un ciclo d'esempio relativo ad un elemento ad attrito in parallelo con un elemento di tipo molla.



**Figura 6.7.** Ciclo isteretico di un elemento ad attrito in parallelo con una molla lineare

La scelta di questo parametro deve essere molto attenta, in quanto si riscontrano grandi variazioni nelle analisi modificandone il valore. Questo problema è già stato evidenziato nel caso di isolatori Friction Pendulum ricalibrati per strutture leggere (Berto, Favaretto e Saetta, 2013). In questo caso si è optato per un valore di  $K_i = 300 \text{ N/mm}$ , sebbene tale valore possa ancora essere aumentato. La scelta di un parametro inferiore ai  $200 \text{ N/mm}$  invece non è risultata compatibile coi risultati ottenuti. Per poter determinare il valore ottimale di tale parametro, esso dovrebbe essere calibrato mediante prove sperimentali di confronto.

Per gli elementi di contatto la matrice di rigidezza può essere espressa nella seguente forma:

$$K_e = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}$$

essendo  $\mathbf{k}$  una sotto matrice:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ -0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_a \end{bmatrix}$$

dove  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_a$  sono i valori delle rigidezze secondo gli assi 1 e 2, e lungo la direzione assiale, rispettivamente.

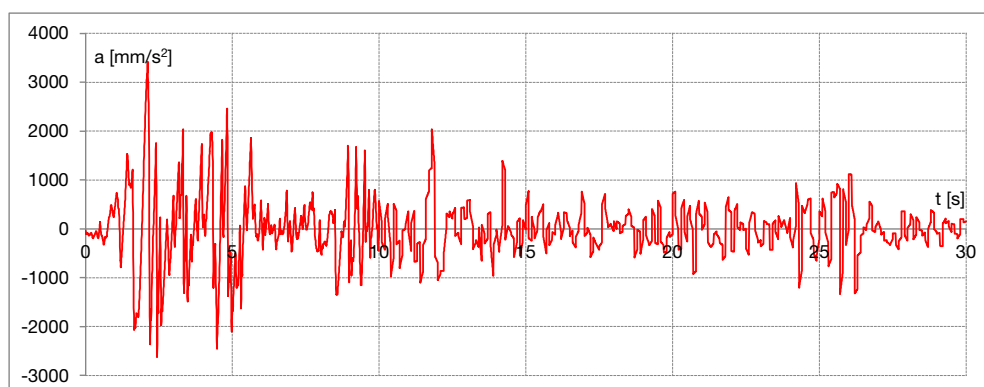
#### 6.2.2.4 Risposta del modello

Di seguito si riporta un semplice esempio numerico di applicazione del sistema di isolamento ad una massa di una tonnellata, isolata utilizzando lo stesso sistema proposto da Guerreiro (Guerreiro, Azevedo e Muhr, 2007), per mostrare l'efficacia del sistema di isolamento RBRL e il funzionamento del modello proposto, per un caso elementare.

<b>M</b>	1000	$Kg$
<b>g</b>	9.81	$m/s^2$
<b>G</b>	9810	$N$
<b>K</b>	Non-lin.	Fig. 6.5
$\mu$	0.015	
$F_{attr}$	147.15	$N$

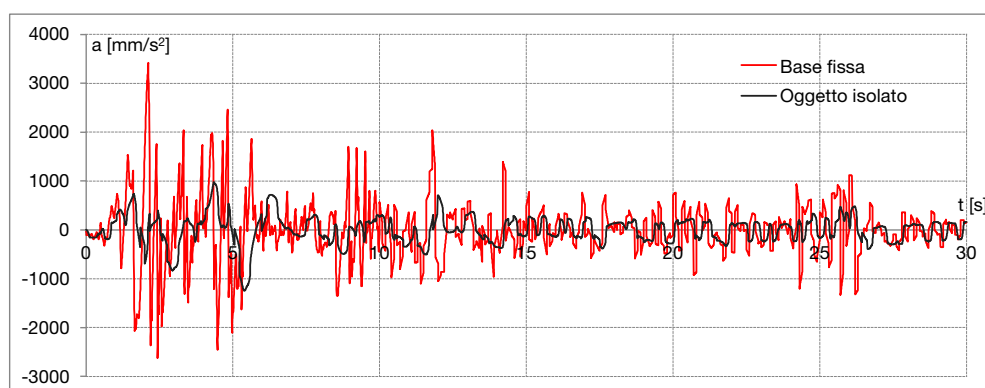
**Tabella 6.2.** Dati oggetto e isolatore

In Figura 6.8 è stato riportato l'accelerogramma del sisma El Centro, con il quale è stato indagato il comportamento dell'isolatore investito da un'azione sismica.



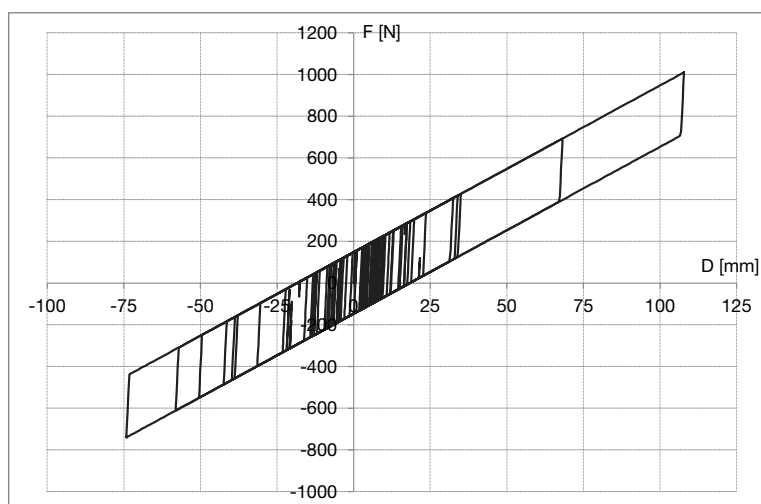
**Figura 6.8.** Accelerogramma, sisma El Centro

Nella Figura 6.9 invece, sono riportate le accelerazioni della struttura considerata a base fissa (rosso) e successivamente a base isolata (nero). Come si può notare il sistema di isolamento garantisce un abbattimento delle accelerazioni che interesserebbero la struttura se considerata a base fissa, ovvero incastrata al suolo.



**Figura 6.9.** Accelerazione a base fissa e con isolamento sismico, sisma El Centro

Infine sono stati plottati i cicli forza-spostamento per l'isolatore esaminato (Figura 6.10).



**Figura 6.10.** Ciclo forza-spostamento El Centro

La pendenza globale del ciclo data dalla presenza delle molle ricentranti laterali, altrimenti, in caso di solo attrito, si sarebbe ottenuto un ciclo isteretico costituito da un rettangolo perfettamente orizzontale, come quello precedentemente presentato in Figura 6.1(b).

## 6.3 Caso studio: le Arche Scaligere, Temperanza

### 6.3.1 Excursus storico

Le Arche scaligere, situate nel centro storico di Verona, sono un monumentale complesso funerario in stile gotico della famiglia degli Scaligeri, destinate a contenere le arche (o tombe) di alcuni illustri rappresentanti della casata, tra cui quella del più grande Signore di Verona, Cangrande, a cui Dante dedica il Paradiso: esse si trovano a fianco della chiesa di Santa Maria Antica, vicino alla Piazza dei Signori.

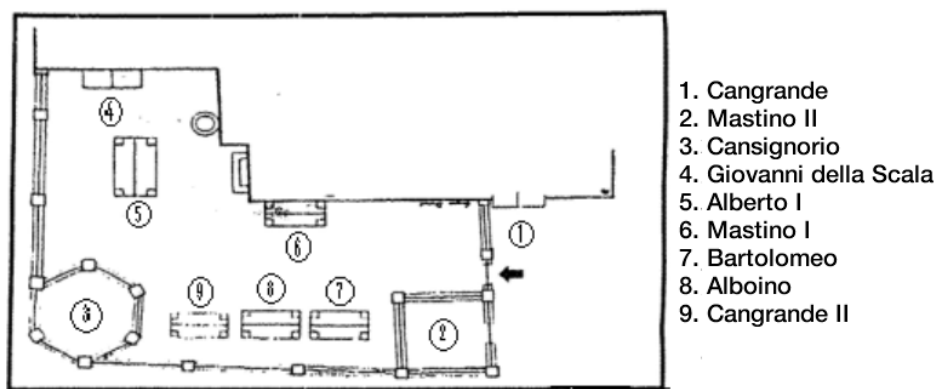


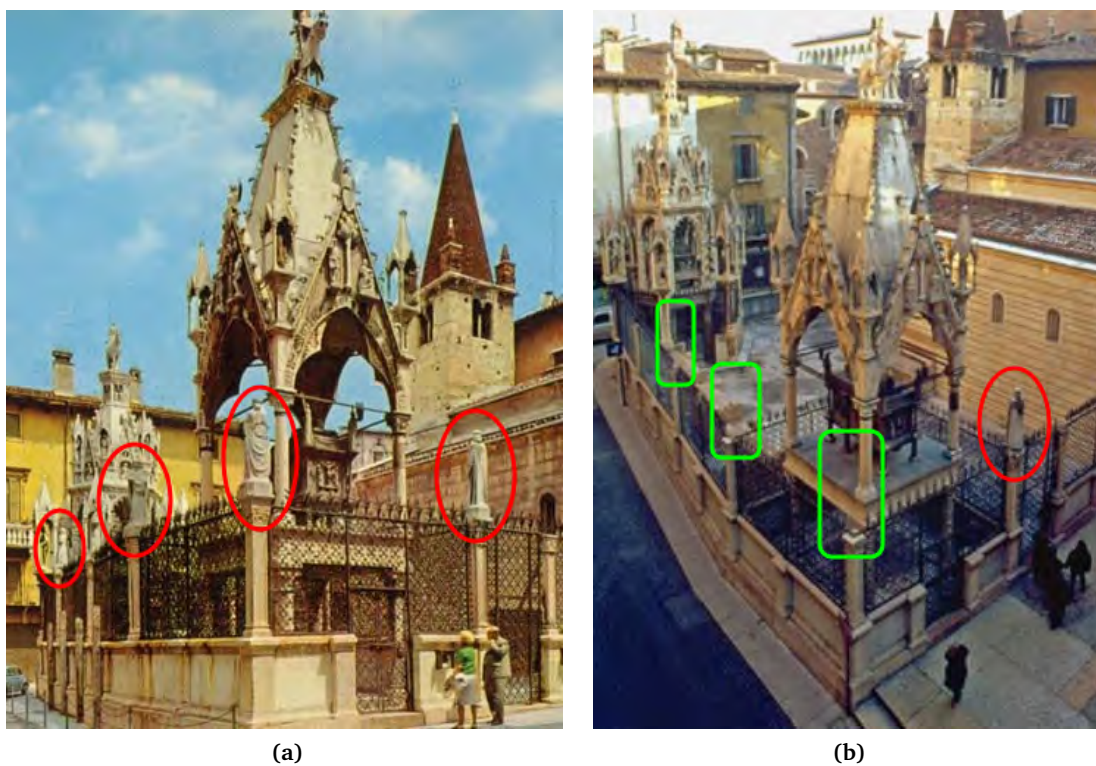
Figura 6.11. Arche Scaligere

Le arche furono realizzate nel XIV secolo da vari scultori e sono considerate forse il più importante esempio dell'arte gotica a Verona, nonostante ciò verso la fine del XVI secolo mostravano già problemi di conservazione, perché in stato di semi abbandono.

Tutto il cimitero, ma a loro volta anche i due monumenti di Mastino II e di Cansignorio, è racchiuso da cancellate in ferro battuto. Tra gli elementi singoli di queste cancellate, lungo tutto il recinto, era una serie di statue (si veda la vecchia foto di Figura 6.12a), le superstiti delle quali furono ricoverate qualche anno fa al Museo di Castelvechio dove si sono potute ammirare, opportunamente restaurate, alla mostra degli Scaligeri. Due di esse, secondo Gian Maria Varanini, dovrebbero rappresentare rispettivamente la città di Verona e quella di Vicenza, altre due Giuditta come Giustizia e Temperanza (Figura 6.13), che è la statua



analizzata in questo lavoro.



**Figura 6.12.** Vecchia sede delle statue (a), e stato attuale (b)



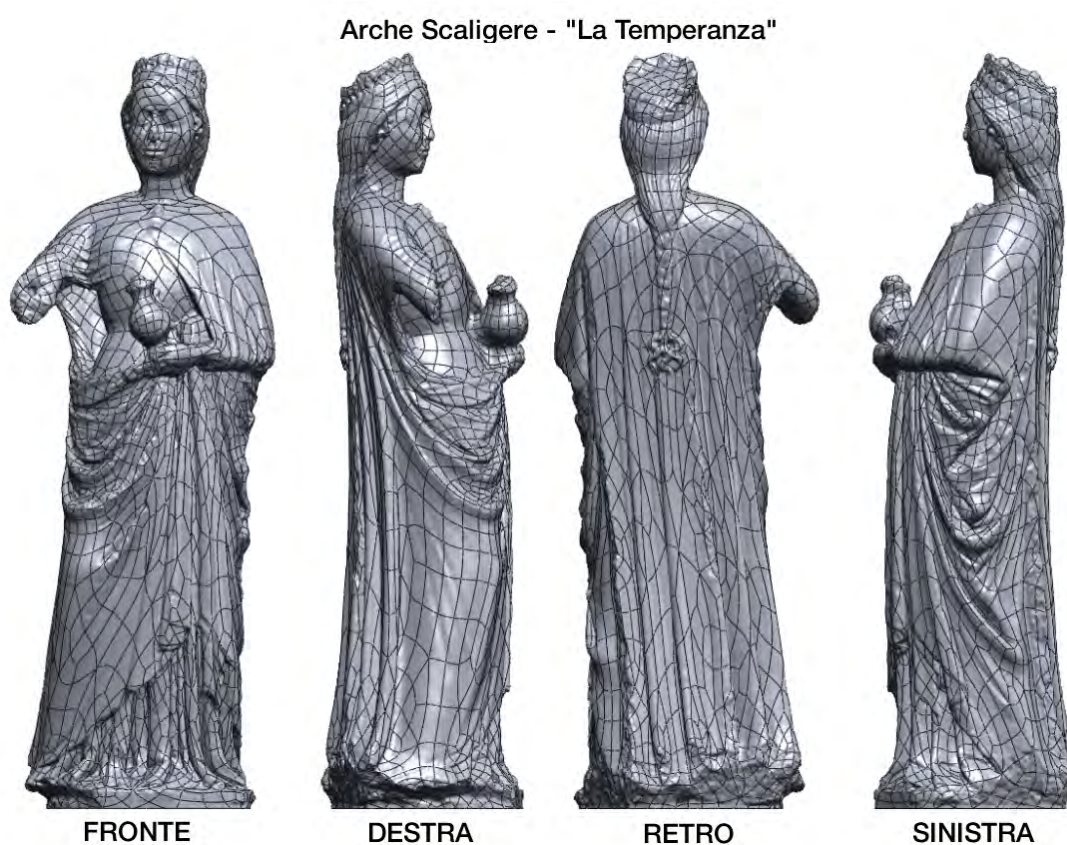
**Figura 6.13.** Statue rimosse, in rosso “La Temperanza”

Le due figure precedenti mostrano il vecchio ed il nuovo stato del sito di collocazione

delle statue; in verde sono evidenziate le statue rimosse, che ora sono state esposte in un museo di Verona (Figura 6.13).

### 6.3.2 Rilievo della statua e mesh utilizzata

La statua raffigurante la Temperanza è stata sottoposta ad un rilievo mediante 134 “3D Scan Shot” per un totale di 4 milioni di punti (modello poligonale di circa 400 Mb), come raffigurato in Figura 6.14, proponendo diverse viste secondo varie angolazioni, per cogliere al meglio tutti i dettagli della statua in 3D.



**Figura 6.14.** La Temperanza, modello 3D digitalizzato, viste

La statua presenta le seguenti caratteristiche geometriche:

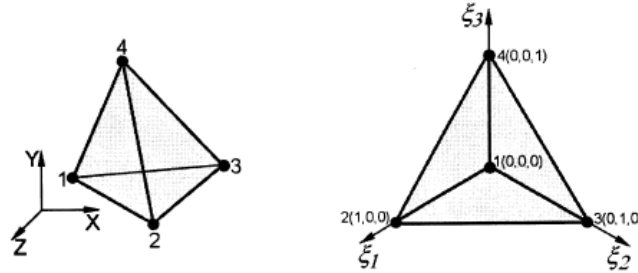
Caratteristiche della statua		
Dimensioni di ingombro		
X	483.328	mm
Y	463.099	mm
Z	1664.622	mm
Posizione del centro di massa		
X	26.9	mm
Y	-23.79	mm
Z	535.56	mm
Volume	137.4	l
Peso stimato	372	Kg
Densità	2706.44	Kg/m <sup>3</sup>

Il riferimento secondo il quale vengono date le coordinate del centro di massa si riferisce alla posizione dell'origine degli assi selezionata dagli esecutori del rilievo e posta sul piano d'appoggio della statua, presumibilmente in posizione baricentrica rispetto all'impronta geometrica della base.



Figura 6.15. Mesh della statua in Straus7, senza e con outlines

In Figura 6.15 è mostrata la mesh adoperata in *Straus7* per modellare la statua. Essa è stata ottenuta a partire dai dati del rilievo mediante Laser Scanner, impiegando elementi *brick* di forma tetraedrica a quattro nodi (*Tetra4*).



**Figura 6.16.** Elemento *brick*, *Tetra4*, in coordinate XYZ e in coordinate naturali

In Figura 6.16 si riporta un elemento di tipo *Tetra4* nelle coordinate spaziali e la sua controparte nelle coordinate naturali.

Le funzioni di forma dell'elemento sono:

$$N_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \begin{cases} 1 - \xi_1 - \xi_2 - \xi_3 & i = 1 \\ \xi_{i-1} & i = 2, 3, 4 \end{cases}$$

Le coordinate naturali nodali sono elencate in Tabella 6.3.

Nodo	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$
1	0	0	0
2	1	0	0
3	0	1	0
4	0	0	1

**Tabella 6.3.** Coordinate naturali

### 6.3.3 Locazione del sito e caratterizzazione sismica

La statua esaminata in questa tesi è collocata in un museo di Verona. Pertanto per condurre le analisi sismiche sull'oggetto, sono state considerate le caratteristiche sismiche del sito secondo le specifiche delle Norme Tecniche del 2008. In Figura 6.17 è mostrata la posizione del sito in scala nazionale.

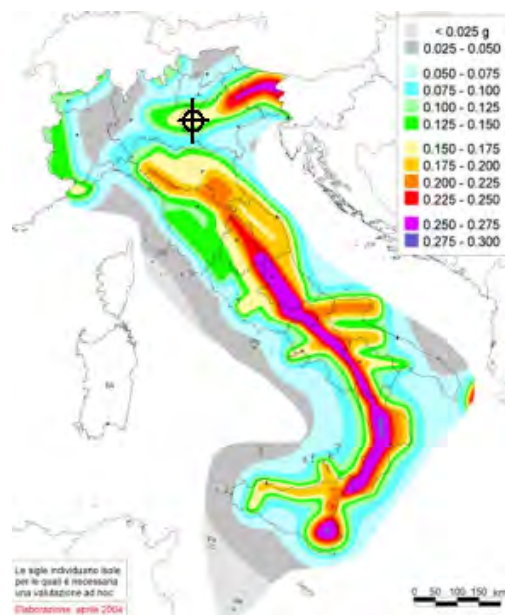


Figura 6.17. Posizione del sito, Verona

Per il sito in questione è stato ottenuto lo spettro allo SLV, considerando un fattore di struttura pari ad 1 per restare in campo elastico. Il terreno scelto è di tipo B e le condizioni topografiche considerate sono T2. Lo spettro è stato riportato in Fig. B.1.

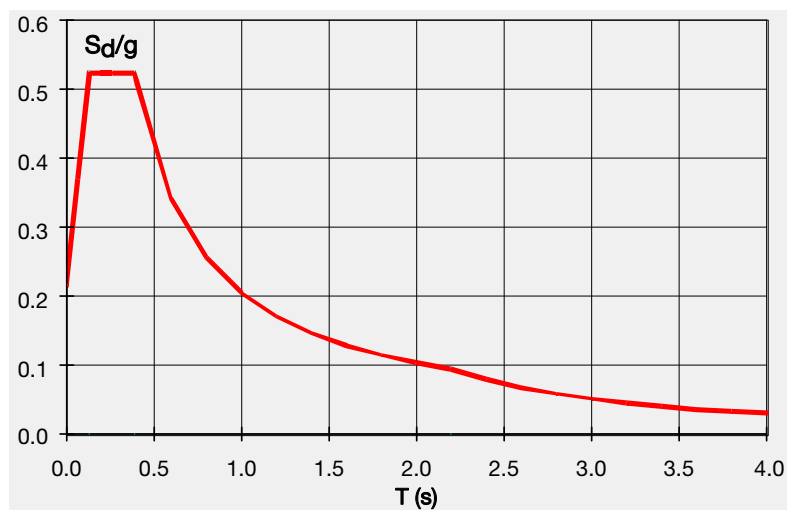


Figura 6.18. Spettro allo SLV, Verona

A partire dallo spettro SLV, utilizzando il programma SIMQKE sono stati generati 7 accelerogrammi spettro-compatibili per svolgere le analisi di Time History sulla statua a base fissa e



successivamente sulla statua dotata di sistema di isolamento alla base.

In Appendice B sono stati riportati i 7 accelerogrammi spettro-compatibili utilizzati nelle analisi.

### 6.3.4 Metodologia di analisi

Nell'analisi effettuata si è scelto di porre un isolatore RBRL sotto alla statua, in modo da ridurre l'energia sismica entrante in essa per prevenirne il danneggiamento.

Per la statua si vuole raggiungere un periodo isolato pari a 2.5 secondi, con uno smorzamento  $\xi = 20\%$ , i dati sono raccolti in Tab. 6.4.

Dati		
T	2.5	s
$\xi$	0.2	
$\mu$	0.015	
K	2.35	N/mm

Tabella 6.4. Caratteristiche del sistema di isolamento

Riprendendo lo spettro sopra considerato, è stata identificata su di esso l'accelerazione sismica cui è sottoposta la statua avente un periodo di oscillazione pari a 2.5 secondi (Fig. 6.19).

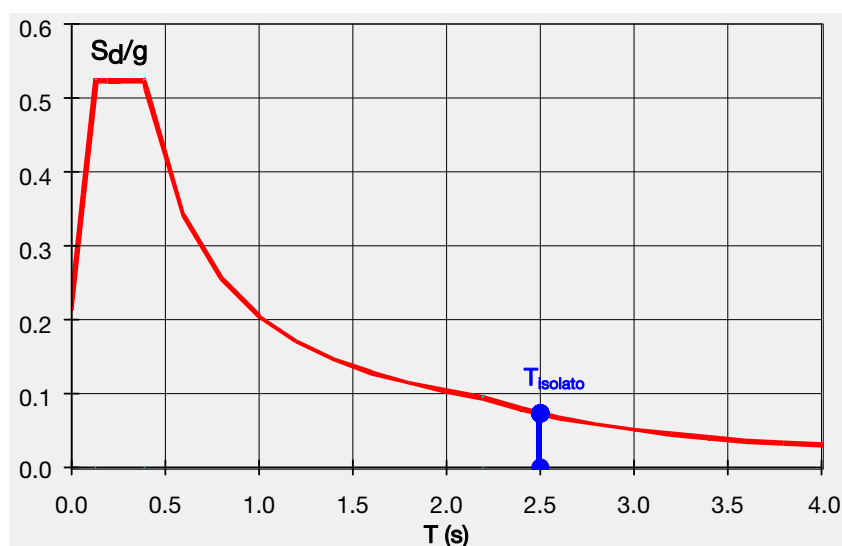


Figura 6.19. Accelerazione di picco per la statua isolata

Si è scelto di procedere secondo i seguenti passaggi:

1. *Analisi dinamica non-lineare* → Utilizzando un modello semplificato come quello presentato al paragrafo 6.2, ovvero considerando la statua come una massa concentrata e calibrando opportunamente i coefficienti di attrito e le rigidezze laterali, date dalle molle ricentranti, sono state individuate le accelerazioni secondo le quali è investita la scultura, prima considerandola a base fissa, poi considerandola isolata. In questo modo non si appesantisce troppo il carico computazionale che, utilizzando l'intero modello con la statua in 3D, sarebbe elevatissimo.
2. *Analisi dinamica lineare* → Successivamente, il modello 3D della statua è stato incastrato alla base ed è stato sottoposto alle accelerazioni calcolate al punto 1, prima utilizzando l'accelerazione del caso a base fissa, e poi utilizzando le accelerazioni risultanti dall'analisi a base isolata.

Questo approccio si ritiene soddisfacente sia dal punto di vista teorico, in quanto la statua isolata si comporta come un corpo che rimane in condizioni elastiche (moto assimilabile quasi a quello di un corpo rigido), sia dal punto di vista computazionale, in quanto questa tipologia di modellazione non va ad appesantire ulteriormente le analisi.

### 6.3.5 Il fenomeno del *rocking*

La statua viene considerata in semplice appoggio sul piatto superiore del dispositivo di isolamento. Bisogna dunque controllare che le accelerazioni indotte dal sisma non siano tali da innescare fenomeni di *rocking* o addirittura portare ad un possibile ribaltamento.

Sulla base di numerose prove su tavola vibrante e simulazioni numeriche, effettuate utilizzando eccitazioni armoniche e sismiche, Ishiyama (1984) riuscì a confermare le formule che descrivevano il fenomeno del *rocking* già esistenti e ne propose di nuove assieme a criteri per indagare la possibilità di ribaltamento per corpi rigidi. Secondo il suo lavoro, il comportamento dei corpi rigidi può essere definito dalla loro altezza e snellezza, in combinazione con la massima accelerazione e velocità dell'eccitazione alla quale sono sottoposti.

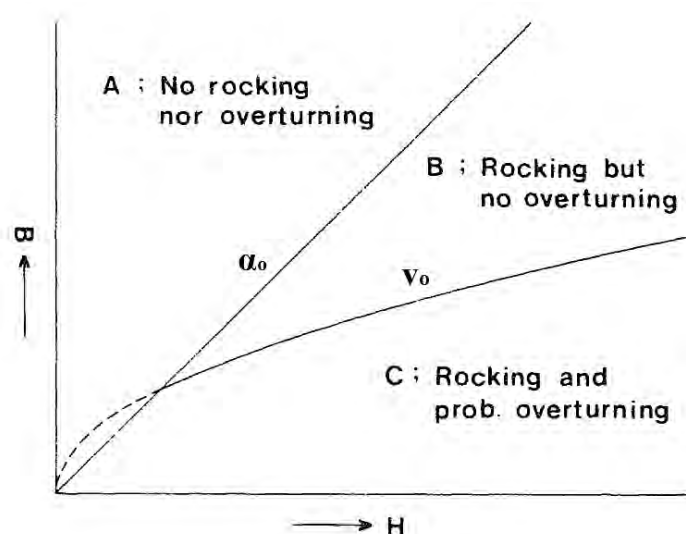


Figura 6.20. Grafico di Ishiyama (Ishiyama, 1980)

La linea dell'accelerazione, confine tra le aree A e B, definisce il limite inferiore di massima accelerazione orizzontale necessaria per avviare il rocking. Questa accelerazione può anche essere determinata dall'analisi cinematica lineare, che per corpi rettangolari e snelli è definita come:

$$a_0 = \frac{B}{H} g$$

Tuttavia, il fenomeno di rocking non porta necessariamente al ribaltamento dell'oggetto. Ishiyama (1984) ha proposto un criterio per il limite inferiore della velocità massima che può provocare il ribaltamento. Questo criterio di velocità per un corpo snello rettangolare può essere approssimato come:

$$v_0 = 10 \frac{B}{\sqrt{H}}$$

con le misure espresse in centimetri.

Dunque considerando la statua del caso studio si ha:

Dati		
B	463	mm
H	1665	mm
$a_0/g$	0.27	

Tabella 6.5. Calcolo dell'accelerazione di *rocking*



Avendo scelto un periodo di isolamento di 2.5 secondi, l'accelerazione massima cui è sottoposta la struttura può essere dedotta dalla Figura 6.19 e, come si può notare, è meno della metà di quella calcolata in Tabella 6.5, perciò si può concludere che la struttura in semplice appoggio non dovrebbe incorrere in problemi di *rocking* o ribaltamento.

### 6.3.6 Risultati delle analisi

#### 6.3.6.1 Analisi statica lineare, carichi gravitazionali

In primo luogo è stata effettuata sulla statua un'analisi statica lineare, considerandola incastrata alla base ed applicandovi soltanto il carico gravitazionale. Gli elementi *brick* sono stati dotati della densità calcolata in base al rapporto tra massa e volume della statua, considerando quest'ultima come un corpo omogeneo, elastico e isotropo privo di fessurazioni o discontinuità.

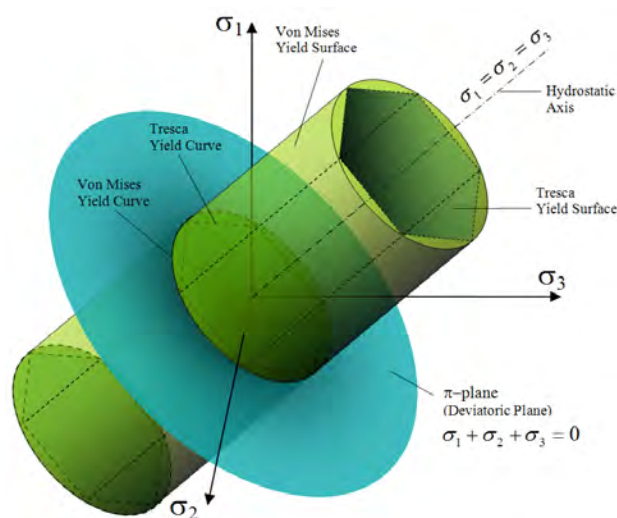
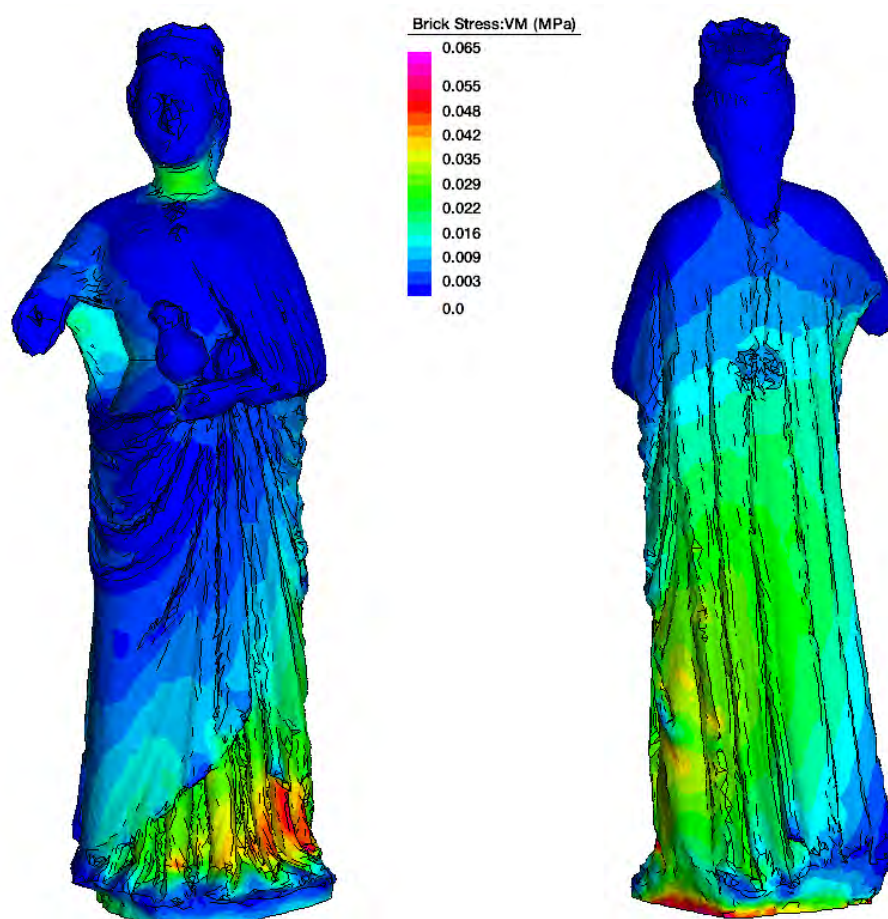


Figura 6.21. Criterio di Von Mises

Gli sforzi sono stati combinati secondo il criterio di Von Mises ovvero assemblando le tensioni principali secondo la:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}$$

Nello spazio delle tensioni principali tale criterio è rappresentato da un cilindro a base ellittica (Figura 6.21).



**Figura 6.22.** Analisi statica lineare, carico gravitazionale

In Figura 6.22 sono stati riportati i risultati di tale analisi, e come risulta evidente dal *contour plot* gli sforzi più gravosi si riscontrano scendendo verso la base e nei punti dove la statua risulta essere più rastremata (il collo per esempio).

Come si può vedere dall'analisi le tensioni massime rilevate nella scultura, sotto l'azione delle forze gravitazionali, raggiungono livelli attorno agli 0.065 MPa alla base della statua, come era lecito aspettarsi. In Tabella 6.6 sono raccolti alcuni valori.

$\sigma_{VonMises}$		
Base		
$\sigma_{max} =$	0.065	MPa
Collo		
$\sigma_{max} =$	0.031	MPa

Tabella 6.6. Tensioni massime, analisi statica lineare

### 6.3.6.2 Analisi dinamiche

Si procede col condurre un'analisi dinamica non-lineare sul modello semplificato per rilevare le accelerazioni che investono la scultura considerata prima a base fissa, poi a base isolata, secondo la procedura esplicita al paragrafo 6.3.4.

I risultati di questa analisi sono riportati in Figura 6.23 per quanto riguarda l'accelerogramma spettro-compatibile numero 1 (Figura B.2).

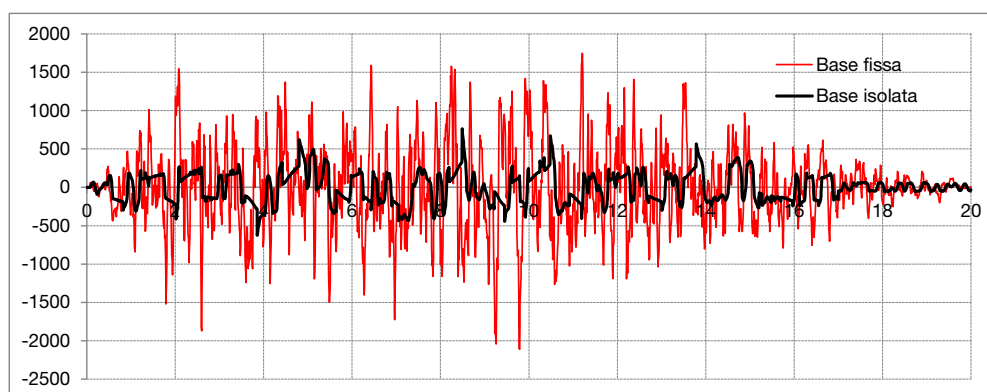
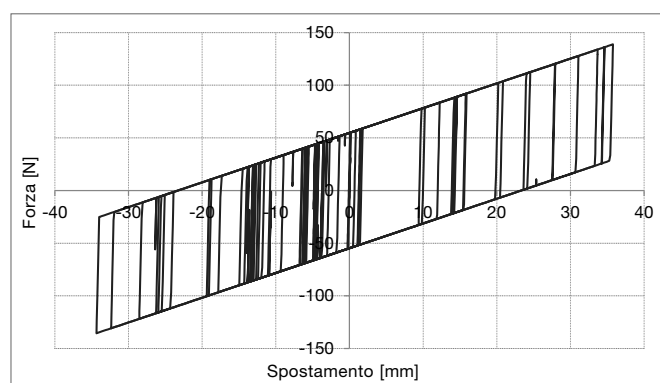


Figura 6.23. Base fissa vs base isolata, accelerogramma Verona 1

Come si può notare dal grafico, le accelerazioni della struttura isolata risultano essere inferiori rispetto a quelle della struttura a base fissa, indicando l'effettivo beneficio del sistema di isolamento.



**Figura 6.24.** Ciclo forza spostamento

Nella Figura 6.24, invece, sono riportati i cicli forza-spostamento per il caso esaminato. L'area racchiusa dal ciclo rappresenta l'energia dissipata dal sistema di isolamento attraverso il lavoro delle forze d'attrito agenti all'interfaccia tra le sfere in acciaio ed i tappetini in gomma costituenti il dispositivo Rolling-Ball Rubber-Layer.

Le accelerazioni ricavate dalla prima analisi sono state poi utilizzate per svolgere una seconda *analisi dinamica lineare* sulla statua, utilizzando questa volta il modello 3D a *brick*. La scultura è stata esaminata prima utilizzando le accelerazioni a base fissa, e poi applicando le accelerazioni a base isolata, in modo da cogliere le differenze tra le due in termini tensionali.

Queste analisi sono state eseguite per tutti e 7 gli accelerogrammi spettro-compatibili ottenuti a partire dallo spettro di riferimento del sito.

Nella Tabella 6.7 è mostrata la riduzione, in termini percentuali, delle accelerazioni di picco tra le analisi effettuate a base fissa e quelle eseguite a base isolata. Risulta evidente l'efficacia del sistema di isolamento utilizzato, con riduzioni dell'ordine del 70% della forza sismica in input nella struttura.

Riduzione delle accelerazioni (%)						
Verona 1	Verona 2	Verona 3	Verona 4	Verona 5	Verona 6	Verona 7
63.90	71.74	60.74	63.10	66.38	68.95	59.57

**Tabella 6.7.** Riduzione delle accelerazioni di picco in termini percentuali

Per tutti e 7 gli accelerogrammi, infatti, si raggiunge almeno il 60% di riduzione del-

l'accelerazione indotta dal sisma nella statua. Il sistema RBRL dunque, può ritenersi molto efficace in termini di protezione della scultura. Sono dunque necessari ulteriori studi per approfondire il dettaglio della modellazione, includendo anche gli effetti locali indagati nei capitoli precedenti (*indentation*).

Nella Figura 6.25 sono illustrati i livelli tensionali rilevati nella statua per l'accelerogramma Verona 1 applicato in direzione X, prima nella configurazione a base fissa, poi nella configurazione a base isolata, in due istanti caratteristici del sisma, ovvero in due momenti per i quali si sono rilevate le tensioni massime per un dato elemento *brick* (*brick* numero 6246 del modello).

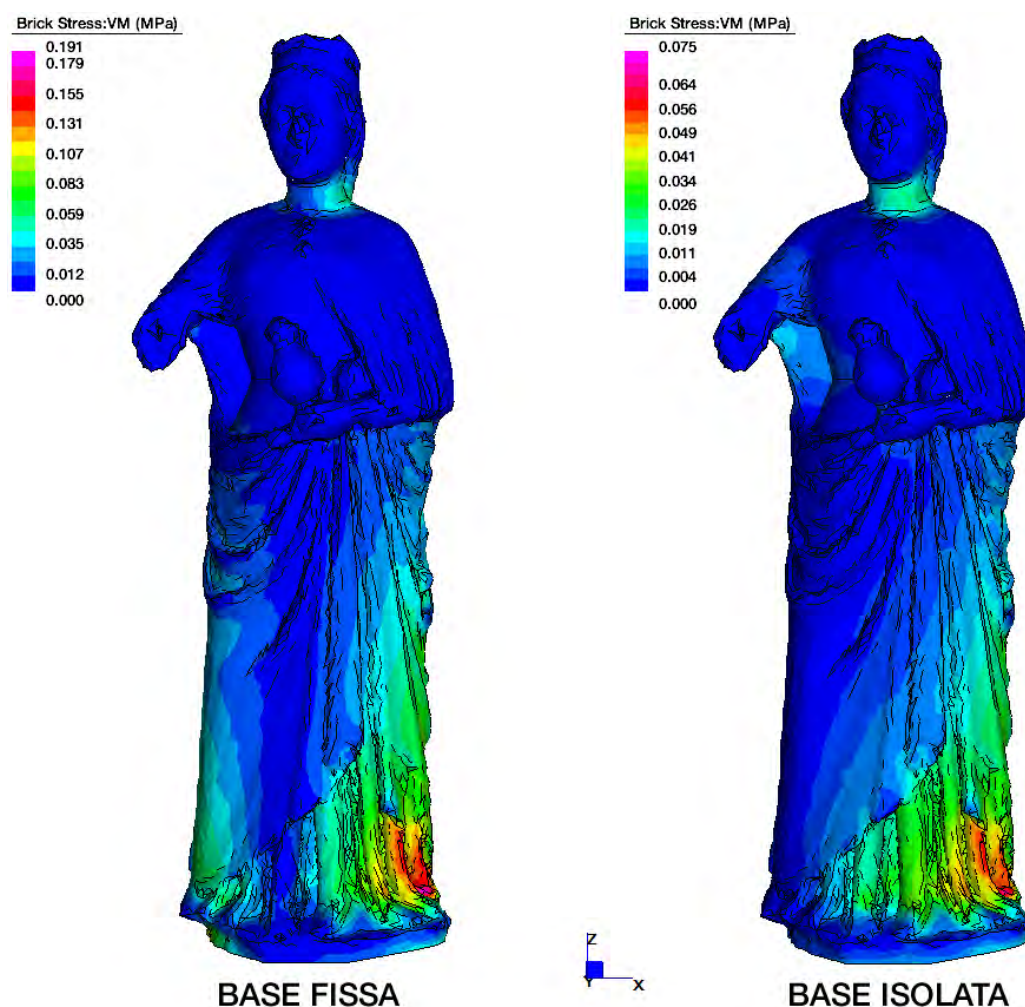
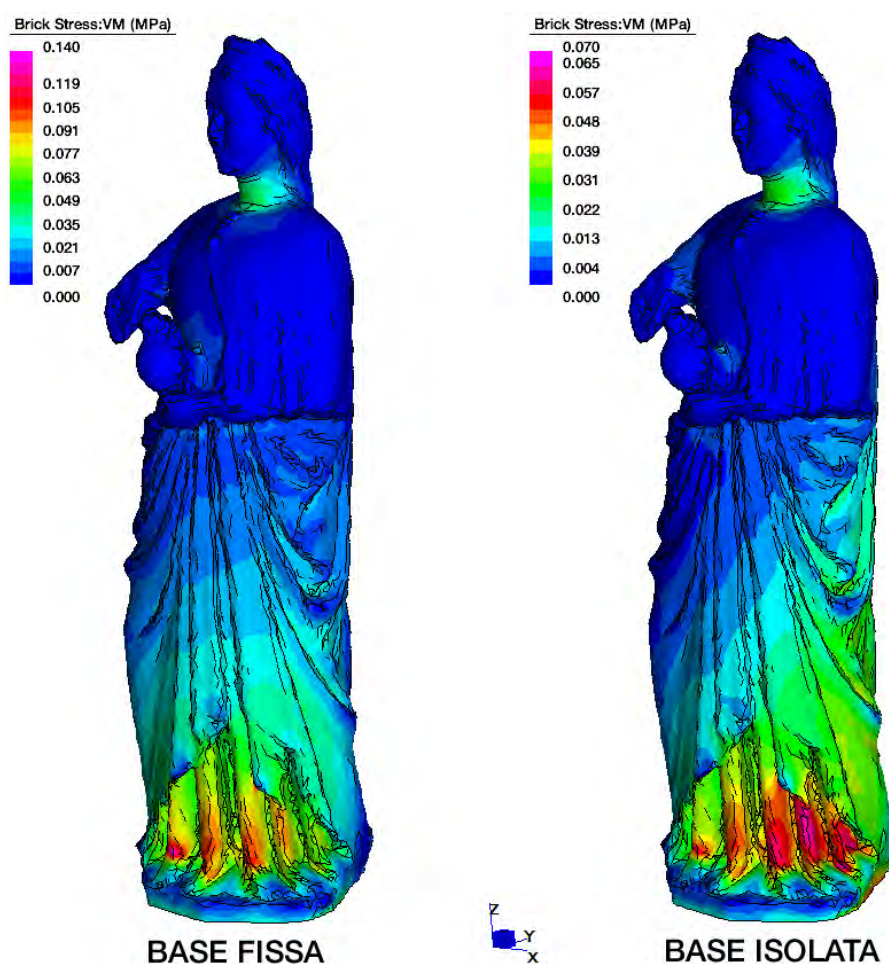


Figura 6.25. Stress nella statua a base fissa e a base isolata, accelerogramma Verona 1, direzione X

Nella Tabella 6.8 sono raccolti i risultati ottenuti nelle tre analisi condotte, per lo stesso elemento considerato.

Tensioni massime brick 6246		
Gravità		
$\sigma_e =$	0.050	MPa
Base fissa + Gravità		
$\sigma_e =$	0.155	MPa
Base isolata + Gravità		
$\sigma_e =$	0.060	MPa

**Tabella 6.8.** Confronto tra le tensioni sullo stesso elemento tra le varie analisi, Verona 1, direzione X



**Figura 6.26.** Stress nella statua a base fissa e a base isolata, accelerogramma Verona 1, direzione Y



Successivamente sono state ripetute le analisi di tipo dinamico lineare in direzione Y, per valutare lo stato tensionale al quale viene sottoposta la scultura per un sisma lungo l'altra direzione principale.

I livelli di *stress* calcolati nella statua in direzione Y sono riportati in Figura 6.26.

Anche in questo caso si assiste ad una riduzione delle accelerazioni per la statua a base isolata, come testimonia la Tabella 6.9, dove si trovano elencate le tensioni calcolate nei tre casi esaminati, questa volta per il *brick* 7774.

Tensioni massime <i>brick</i> 7774		
Gravità		
$\sigma_e =$	0.051	MPa
Base fissa + Gravità		
$\sigma_e =$	0.149	MPa
Base isolata + Gravità		
$\sigma_e =$	0.064	MPa

**Tabella 6.9.** Confronto tra le tensioni sullo stesso elemento tra le varie analisi, Verona 1, direzione Y

Avendo indicato con  $\rho$  ( $\rho = 1 - \sigma_{isol}/\sigma_{fix}$ ) un parametro che esprime la riduzione delle tensioni combinate secondo Von Mises all'interno della statua, si può creare la Tabella 6.10 che esprime l'efficacia del sistema di isolamento in termini di beneficio dal punto di vista tensionale per l'oggetto da proteggere sismicamente.

Riduzione delle tensioni		
Sisma in direzione X		
$\rho =$	61.2	%
Sisma in direzione Y		
$\rho =$	57.0	%

**Tabella 6.10.** Riduzione delle tensioni per sisma in X e in Y

La tabella precedente mostra che dal punto di vista tensionale, osservando i risultati ottenuti applicando l'accelerogramma denominato Verona 1 nelle due direzioni principali si assiste a riduzioni di tensione, tra la struttura a base fissa e quella sismicamente isolata, dell'ordine del 60%.

Osservando i risultati ottenuti per entrambe le analisi condotte lungo le due direzioni principali, si può concludere che il sistema di isolamento RBRL sia un efficace mezzo per proteggere oggetti leggeri, in questo caso anche con un valore culturale aggiunto, dall'azione distruttiva del sisma.

Sarebbe opportuno a questo punto, estendere il modello *Straus* inglobando anche gli effetti di *indentation*, e provando ad assegnare alla struttura un sisma bidirezionale in modo da rilevare risultati più realistici, visto che le analisi effettuate in questo studio utilizzando un modello di calcolo semplificato, hanno rivelato risultati promettenti.

In conclusione, visti i risultati ottenuti da questa prima analisi su un oggetto di interesse storico-culturale, appare evidente l'efficacia del sistema *Rolling-Ball Rubber-Layer* per proteggere strutture leggere dall'azione sismica, anche in caso di terremoti di lieve entità. Ci si auspica quindi, che ulteriori indagini vengano effettuate in futuro per migliorare questo prototipo di modello.





---

# APPENDICE A

## ABACHI PER LA PROGETTAZIONE

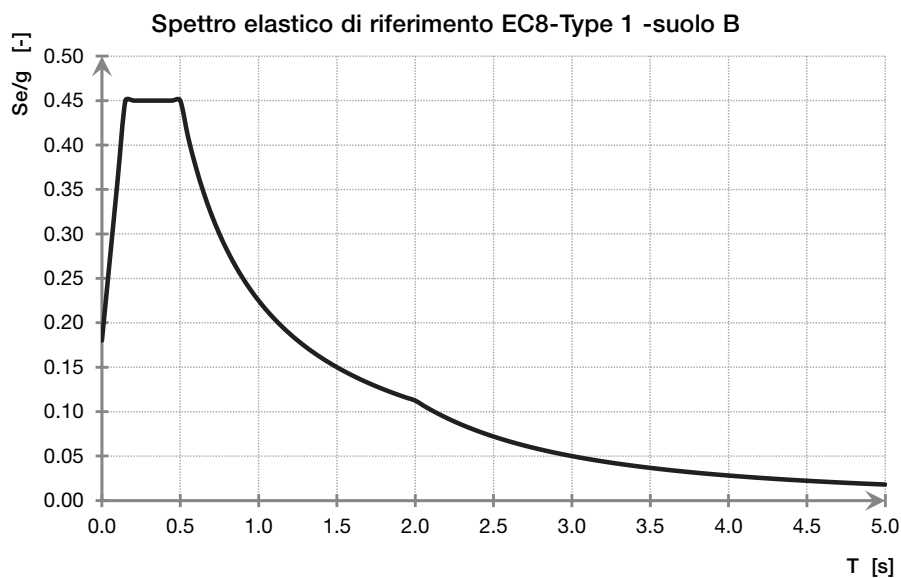
---

In questo capitolo si propongono gli abachi determinati tramite un'analisi parametrica utilizzando il software *Matlab*, per un terreno di tipo B e varie configurazioni di massa, periodo di isolamento, rigidezza, smorzamento, coefficiente di attrito, ritenute soddisfacenti per l'applicazione del dispositivo RBRL per strutture leggere.

Tramite lo *script* che è stato creato è possibile creare molto semplicemente altri abachi di questo tipo per diverse configurazioni dei parametri sopra citati, modificando opportunamente le caratteristiche richieste.-

Per determinare i vari parametri è stato utilizzato uno spettro elastico di riferimento, ottenuto mediante le formule fornite da Eurocodice 8, considerando uno spettro di tipo 1 ed un suolo di tipo B (Figura A.1).

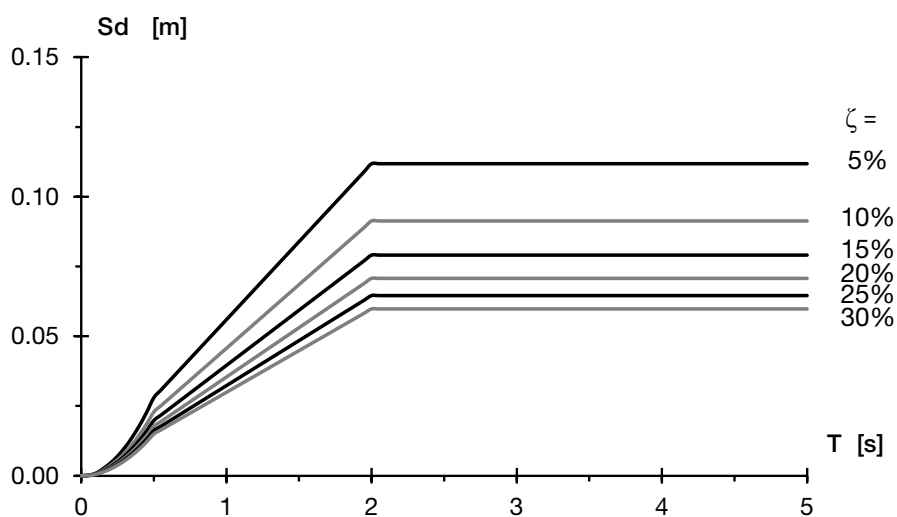
Caratteristiche spettro		
Suolo B		
$S$	1.20	
$T_b$	0.15	s
$T_c$	0.5	s
$T_d$	2	s
$\xi$	5	%



**Figura A.1.** Spettro elastico in accelerazione, EC8, tipo 1, suolo B

Una volta determinato lo spettro elastico in spostamento, mediante l'impiego del fattore  $R_\xi$  si determina lo spettro in spostamento per qualsiasi valore di  $\xi$  voluto (Figura A.2):

$$R_{\xi_0} = (0.10/(0.05 + \xi))^{0.5}$$



**Figura A.2.** Spettro in spostamento EC8 per diversi valori di smorzamento

Le tabelle seguenti propongono gli abachi calcolati a partire dai dati appena proposti.

ABACHI PER LA PROGETTAZIONE DISPOSITIVO RBRL														
Parametro di stress ( $W^*$ )														
0.6			0.8			1			1.2			1.4		
$\mu$	t/R		$\mu$	t/R		$\mu$	t/R		$\mu$	t/R		$\mu$	t/R	
0.008	0.089	0.009	0.009	0.098	0.01	0.01	0.11	0.011	0.011	0.115	0.012	0.121	0.013	0.126
0.009	0.128	0.01	0.01	0.135	0.011	0.011	0.14	0.012	0.012	0.150	0.013	0.154	0.014	0.157
0.01	0.176	0.011	0.011	0.180	0.012	0.012	0.19	0.013	0.013	0.191	0.014	0.193	0.015	0.194
0.011	0.235	0.012	0.012	0.235	0.013	0.013	0.24	0.014	0.014	0.239	0.015	0.239	0.016	0.236
0.012	0.307	0.013	0.013	0.301	0.014	0.014	0.30	0.015	0.015	0.295	0.016	0.291	0.017	0.284
0.013	0.393	0.014	0.014	0.377	0.015	0.015	0.37	0.016	0.016	0.360	0.017	0.350	0.018	0.338
0.014	0.494	0.015	0.015	0.467	0.016	0.016	0.45	0.017	0.017	0.433	0.018	0.417	0.019	0.399
0.015	0.612	0.016	0.016	0.570	0.017	0.017	0.54	0.018	0.018	0.517	0.019	0.492	0.02	0.467
0.016	0.751	0.017	0.017	0.690	0.018	0.018	0.65	0.019	0.019	0.611	0.02	0.577	0.021	0.543
0.017	0.910	0.018	0.018	0.826	0.019	0.019	0.77	0.02	0.02	0.717	0.021	0.671	0.022	0.627
0	0.000	0.019	0.019	0.981	0.02	0.02	0.90	0.021	0.021	0.835	0.022	0.776	0.023	0.719
0	0.000	0	0	0.000	0.021	0.021	1.05	0.022	0.022	0.968	0.023	0.892	0.024	0.822
0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.00	0.023	0.023	1.116	0.024	1.021	0.025	0.934
0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.00	0	0	0.000	0	0.000	0.026	1.057

Tabella A.1. Abaco per la scelta dello spessore del tappetino e del diametro delle sfere

D corner =149 mm					
<i>SUOLO B - <math>a_g = 0.2 g</math></i>					
M [ton]	$\zeta$	T [s]	D [mm]	K [N/mm]	$\mu$
0.3	0.1	1	60.8	11.84	0.046
0.3	0.1	2	121.7	2.96	0.023
0.3	0.1	3	121.7	1.32	0.010
0.3	0.1	4	121.7	0.74	0.006
0.3	0.2	1	47.1	11.84	0.087
0.3	0.2	2	94.2	2.96	0.043
0.3	0.2	3	94.2	1.32	0.019
0.3	0.2	4	94.2	0.74	0.011
0.3	0.3	1	39.8	11.84	0.143
0.3	0.3	2	79.6	2.96	0.071
0.3	0.3	3	79.6	1.32	0.032
0.3	0.3	4	79.6	0.74	0.018
0.6	0.1	1	60.8	23.69	0.046
0.6	0.1	2	121.7	5.92	0.023
0.6	0.1	3	121.7	2.63	0.010
0.6	0.1	4	121.7	1.48	0.006
0.6	0.2	1	47.1	23.69	0.087
0.6	0.2	2	94.2	5.92	0.043
0.6	0.2	3	94.2	2.63	0.019
0.6	0.2	4	94.2	1.48	0.011
0.6	0.3	1	39.8	23.69	0.143
0.6	0.3	2	79.6	5.92	0.071
0.6	0.3	3	79.6	2.63	0.032
0.6	0.3	4	79.6	1.48	0.018
1.2	0.1	1	60.8	47.37	0.046
1.2	0.1	2	121.7	11.84	0.023
1.2	0.1	3	121.7	5.26	0.010
1.2	0.1	4	121.7	2.96	0.006
1.2	0.2	1	47.1	47.37	0.087
1.2	0.2	2	94.2	11.84	0.043
1.2	0.2	3	94.2	5.26	0.019
1.2	0.2	4	94.2	2.96	0.011
1.2	0.3	1	39.8	47.37	0.143
1.2	0.3	2	79.6	11.84	0.071
1.2	0.3	3	79.6	5.26	0.032
1.2	0.3	4	79.6	2.96	0.018

Tabella A.2. Abaco per la scelta dei parametri di isolamento 1

D corner = 112 mm					
<i>SUOLO B - <math>a_g = 0.15 g</math></i>					
M [ton]	$\zeta$	T [s]	D [mm]	K [N/mm]	$\mu$
0.3	0.1	1	45.7	11.84	0.034
0.3	0.1	2	91.4	2.96	0.017
0.3	0.1	3	91.4	1.32	0.008
0.3	0.1	4	91.4	0.74	0.004
0.3	0.2	1	35.4	11.84	0.065
0.3	0.2	2	70.8	2.96	0.033
0.3	0.2	3	70.8	1.32	0.015
0.3	0.2	4	70.8	0.74	0.008
0.3	0.3	1	29.9	11.84	0.107
0.3	0.3	2	59.9	2.96	0.054
0.3	0.3	3	59.9	1.32	0.024
0.3	0.3	4	59.9	0.74	0.013
0.6	0.1	1	45.7	23.69	0.034
0.6	0.1	2	91.4	5.92	0.017
0.6	0.1	3	91.4	2.63	0.008
0.6	0.1	4	91.4	1.48	0.004
0.6	0.2	1	35.4	23.69	0.065
0.6	0.2	2	70.8	5.92	0.033
0.6	0.2	3	70.8	2.63	0.015
0.6	0.2	4	70.8	1.48	0.008
0.6	0.3	1	29.9	23.69	0.107
0.6	0.3	2	59.9	5.92	0.054
0.6	0.3	3	59.9	2.63	0.024
0.6	0.3	4	59.9	1.48	0.013
1.2	0.1	1	45.7	47.37	0.034
1.2	0.1	2	91.4	11.84	0.017
1.2	0.1	3	91.4	5.26	0.008
1.2	0.1	4	91.4	2.96	0.004
1.2	0.2	1	35.4	47.37	0.065
1.2	0.2	2	70.8	11.84	0.033
1.2	0.2	3	70.8	5.26	0.015
1.2	0.2	4	70.8	2.96	0.008
1.2	0.3	1	29.9	47.37	0.107
1.2	0.3	2	59.9	11.84	0.054
1.2	0.3	3	59.9	5.26	0.024
1.2	0.3	4	59.9	2.96	0.013

Tabella A.3. Abaco per la scelta dei parametri di isolamento 2

D corner = 74.6 mm					
<i>SUOLO B - <math>a_g = 0.10 g</math></i>					
M [ton]	$\zeta$	T [s]	D [mm]	K [N/mm]	$\mu$
0.3	0.1	1	30.5	11.84	0.023
0.3	0.1	2	60.9	2.96	0.011
0.3	0.1	3	60.9	1.32	0.005
0.3	0.1	4	60.9	0.74	0.003
0.3	0.2	1	23.6	11.84	0.044
0.3	0.2	2	47.2	2.96	0.022
0.3	0.2	3	47.2	1.32	0.010
0.3	0.2	4	47.2	0.74	0.005
0.3	0.3	1	19.9	11.84	0.072
0.3	0.3	2	39.9	2.96	0.036
0.3	0.3	3	39.9	1.32	0.016
0.3	0.3	4	39.9	0.74	0.009
0.6	0.1	1	30.5	23.69	0.023
0.6	0.1	2	60.9	5.92	0.011
0.6	0.1	3	60.9	2.63	0.005
0.6	0.1	4	60.9	1.48	0.003
0.6	0.2	1	23.6	23.69	0.044
0.6	0.2	2	47.2	5.92	0.022
0.6	0.2	3	47.2	2.63	0.010
0.6	0.2	4	47.2	1.48	0.005
0.6	0.3	1	19.9	23.69	0.072
0.6	0.3	2	39.9	5.92	0.036
0.6	0.3	3	39.9	2.63	0.016
0.6	0.3	4	39.9	1.48	0.009
1.2	0.1	1	30.5	47.37	0.023
1.2	0.1	2	60.9	11.84	0.011
1.2	0.1	3	60.9	5.26	0.005
1.2	0.1	4	60.9	2.96	0.003
1.2	0.2	1	23.6	47.37	0.044
1.2	0.2	2	47.2	11.84	0.022
1.2	0.2	3	47.2	5.26	0.010
1.2	0.2	4	47.2	2.96	0.005
1.2	0.3	1	19.9	47.37	0.072
1.2	0.3	2	39.9	11.84	0.036
1.2	0.3	3	39.9	5.26	0.016
1.2	0.3	4	39.9	2.96	0.009

Tabella A.4. Abaco per la scelta dei parametri di isolamento 3

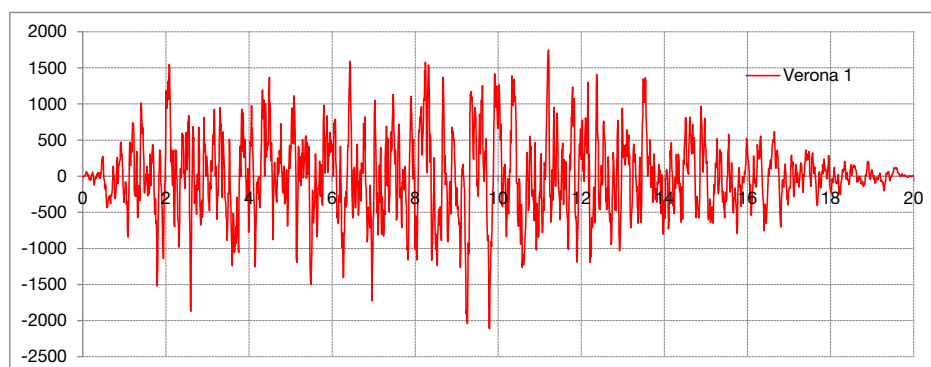
---

# APPENDICE B

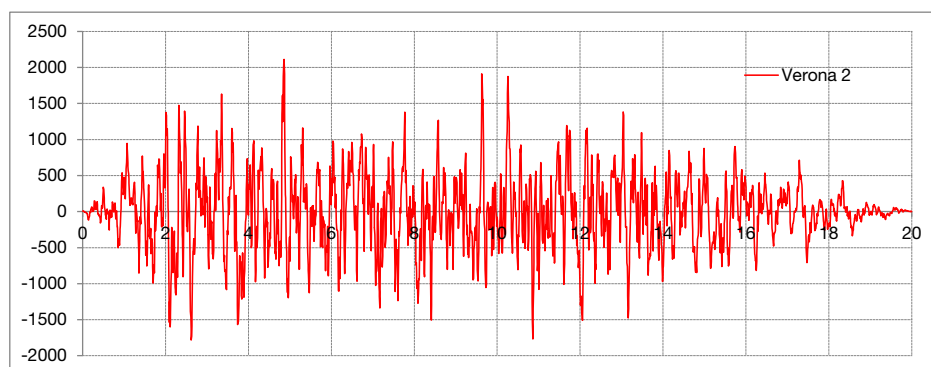
## ACCELEROGRAMMI

---

In questa appendice vengono proposti i 7 accelerogrammi spettro-compatibili ottenuti con il programma *SIMQKE*. In ascissa si trova il tempo espresso in secondi, mentre in ordinata vi sono le accelerazioni espresse in  $mm/s^2$ .

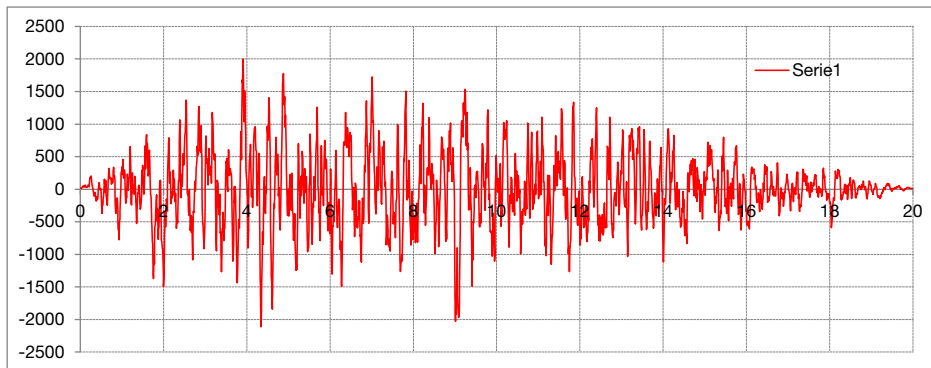


**Figura B.1.** Accelerogramma 1

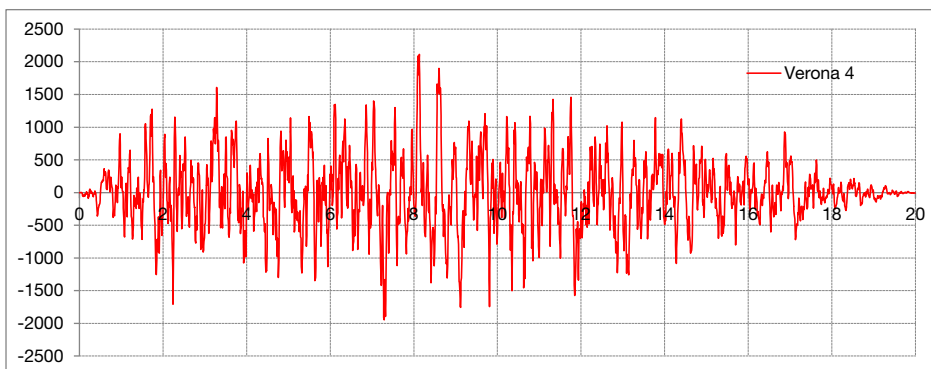


**Figura B.2.** Accelerogramma 2

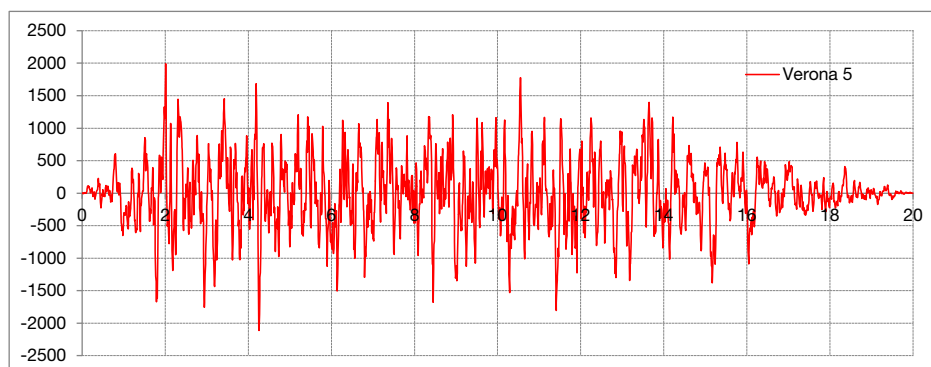




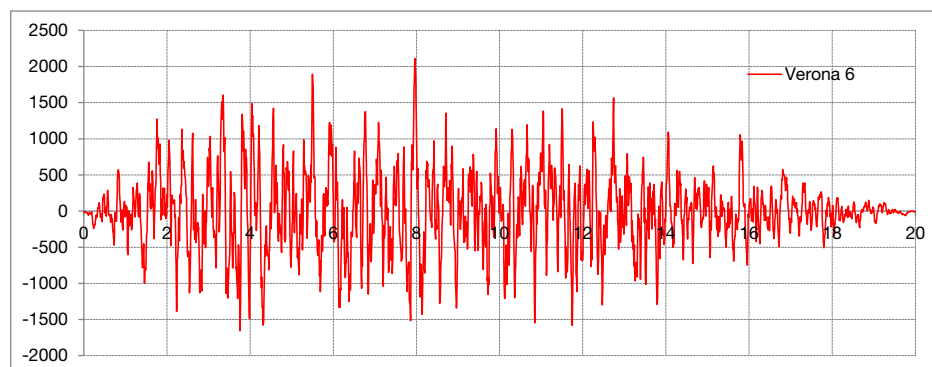
**Figura B.3.** Accelerogramma 3



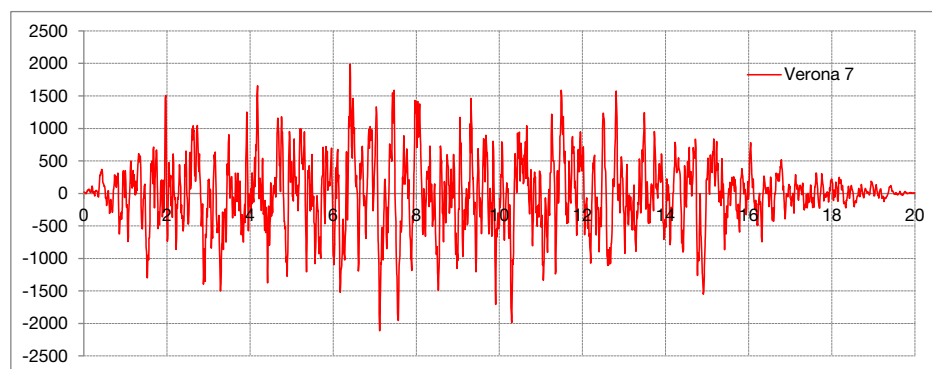
**Figura B.4.** Accelerogramma 4



**Figura B.5.** Accelerogramma 5



**Figura B.6.** Accelerogramma 6



**Figura B.7.** Accelerogramma 7



## BIBLIOGRAFIA

---

- Achour, N. et al. (2011). «Earthquake induced structural and non-structural damage in hospitals». In: *Earthquake Spectra* 27, pp. 617–634 (cit. a p. 46).
- Ahmadi, H.R. e A.H. Muhr (1997). «Modelling dynamic properties of filled rubber». In: *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*. Vol. 26. 10 (cit. alle pp. 74, 89).
- Ahmadi, H.R., A.H. Muhr e J.G.R. Kingston (2005). «Dynamic properties of filled rubber - Part I: simple model, experimental data and simulated results». In: *Rubber Chemistry and Technology* 81 (cit. a p. 73).
- Alessandri, S. et al. (2014). «Assessment of the seismic response of a base isolated HV circuit breaker with steel cable dampers». In: *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Istanbul (cit. a p. 61).
- Baggio, S. et al. (2013). «Mitigazione del rischio sismico per beni artistici mobili: un sistema di isolamento sismico». In: (cit. a p. 50).
- Bertero, V.V. e C.M. Uang (2003). «Issues and future directions in the use of an energy approach for seismic-resistant design of structures». In: *Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*. A cura di P. Fajfar e H. Krawinkler. Taylor & Francis (cit. a p. 30).
- Berto, L., T. Favaretto e A. Saetta (2013). «Seismic risk mitigation technique for art objects: experimental evaluation and numerical modelling of double concave curved surface sliders». In: *Bull Earthquake Eng* (cit. alle pp. 50, 146).
- Bondonet, G. e A. Filiatrault (1997). «Frictional Response of PTFE sliding bearings a high frequencies». In: *Journal of Bridge Engineering* 2.4, pp. 139–148 (cit. a p. 37).

- Bongiovanni, G. et al. (2011). «Principi dell'isolamento sismico e applicazioni in campo nucleare». In: *Focus, Energia Ambiente e Innovazione* 1-2 (cit. a p. 5).
- Buckle, I.G. e R.L. Mayes (1990). «Seismic Isolation: History, Application, and Performance - A World View». In: *Earthquake Spectra* 6.2 (cit. a p. 8).
- Caldwell, P., J.A. Gatscher e S.R. Littler (2007). «Essential Elements of Equipment Seismic Qualification to ASCE 7 by Shake Table Testing». In: ASCE/SEI 2007 Structures Engineering Congress. (2007). Long Beach, CA (cit. a p. 47).
- Clemente, P. (2010). «Dagli "strati di carbone e lana" ai moderni dispositivi antisismici». In: *Attività in campo sismico. Nuovi studi e sviluppi futuri* (ENEA). (2010). Casaccia, Italy (cit. a p. 6).
- Cook, J.W. et al. (1997). «Rolling-Ball isolation system for light structures». In: International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation & Active Control of Seismic Vibrations of Structures. Taormina, Italy (cit. a p. 82).
- De Canio, G. e C. Modena. «Earthquake protection of movable and semi-movable cultural assets in their exposition sites». In: (cit. a p. 63).
- De Stefani, L. (2012). «Tecniche innovative per il miglioramento sismico di edifici storico-monumentali». Tesi di dott. Università degli Studi di Padova (cit. a p. 5).
- Demetriades, G.F., M.C. Constantinou e A.M. Reinhorn (1993). «Study of wire rope systems for seismic protection of equipment in buildings». In: *Eng. Struct.* 15.5 (cit. alle pp. 61, 62).
- Dolce, M. et al. (2010). *Progetto di Edifici con Isolamento Sismico*. IUSS Press (cit. a p. 32).
- Donà, M. (2015). «Rolling-Ball Rubber-Layer System for the lightweight structures seismic protection: experimentation and numerical analyses». Tesi di dott. Università degli Studi di Padova (cit. alle pp. 82, 127, 129).
- Donà, M. et al. (2014). «Isolation of light structures with Rolling-Ball Rubber-Layer system - characteristics and performance». In: Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Istanbul (cit. alle pp. 77-79, 136).

- Erdik, M et al. (2009). «Earthquake risk mitigation in Istanbul museums». In: *Springer Science+Business Media* (cit. a p. 58).
- G+DComputing (2004). *Theoretical Manual. Theoretical background to the Straus7 finite element analysis system* (cit. alle pp. 139, 142, 143).
- Goodno, B.J. et al. (2011). «Effects of the January 2010 Haitian Earthquake on Selected Electrical Equipment». In: *Earthquake Spectra* 27, S251–S276 (cit. a p. 48).
- Guerreiro, L., J. Azevedo e A.H. Muhr (2007). «Seismic Tests and Numerical Modeling of a Rolling-ball Isolation System». In: *Journal of Earthquake Engineering* 11.1, pp. 49–66 (cit. alle pp. 77, 78, 81, 85, 88, 135, 136, 140, 147).
- Gunn, S.W.A. (1995). «Health effects of earthquakes». In: *Disaster Prevention and Management* 4, pp. 6–10 (cit. a p. 46).
- Ishiyama, Y. (1980). «Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations.» In: *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Enigneering* 17, pp. 24–37 (cit. a p. 157).
- Kelly, J.M. (1990). *Base isolation: linear theory and design*. *Earthquake Spectra*, 6, 223-244 (cit. a p. 29).
- Kelly, J.M. e F. Naeim (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley e Sons, Inc (cit. a p. 27).
- Kesti, M.G., W. Mowrtage e M. Erdik (2010). «Earthquake Risk Reduction of Structures by A Low-Cost Base Isolation Device : Experimental Study on BNC Bearings». In: 14th European Conference on Earthquake Engineering. Ohrid, Macedonia (cit. a p. 57).
- Legeza, V.P. (2002). «Rolling of a heavy ball in a spherical recess of a translationally moving body». In: *International Applied Mechanics* 38.6, pp. 758–764 (cit. a p. 59).
- Liberatore, D. (A cura di) (2000). *Vulnerabilità dei beni archeologici e degli oggetti esibiti nei musei*. A cura di CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - Roma. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - Roma (cit. a p. 20).

- Lowry, M. et al. (2007). «Protecting Collections in the J. Paul Getty Museum from Earthquake Damage». In: *WAAC (Western Association for Art Conservation) Newsletter* 29.3 (cit. a p. 54).
- Marsico, M.R. (2009). «Seismic Isolation and Energy Dissipation: theoretical basis and application». Tesi di dott. Università Federico II di Napoli (cit. a p. 31).
- Martelli, A. (2010). «Le Moderne Tecnologie Antisismiche nell'Adeguamento degli Edifici Storici». In: *Nuove Tecnologie Per l'Adeguamento Sismico degli Edifici Storici ENEA*. Rome, Italy (cit. a p. 6).
- Matta, E, A. De Stefano e B.F.Jr Spencer (2009). «A new passive rolling-pendulum vibration absorber using a non-axial-symmetrical guide to achieve bidirectional tuning». In: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 38, pp. 1729–1750 (cit. a p. 59).
- McKay, G.R., H.E. Chapman e D.K. Kirkcaldie (1990). «Seismic Isolation: New Zeland Applications». In: *Earthquake Spectra* 6.2 (cit. a p. 11).
- Morgan, T.A. e A.S. Whittaker (2001). «Cyclic Behavior of High Damping Rubber Bearings». In: *Proc. 5th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures*. Rome, Italy (cit. alle pp. 34, 36).
- Muhr, A.H. (2005). «Modeling the stress-strain behavior of rubber». In: *Rubber Chemistry and Technology* 78 (cit. a p. 71).
- Muhr, A.H., M. Sulong e A.G. Thomas (1997). «Rolling-ball Rubber-layer Isolators». In: *Journal of natural rubber research* 12, pp. 199–214 (cit. alle pp. 84, 117, 129, 130).
- Neurohr, T. (2005). «Seismic Vulnerability of Art Objects: Literature Review Report». In: *Structural Engineering Series, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montréal, Canada* 4 (cit. alle pp. 45, 46).
- Oikonomou, K., M.C. Costantinou e A.M. Reinhorn (2012). «Seismic Isolation of Electrical Equipment "Seismic Table Simulation"». In: *15th WCEE*. (2012). Lisbona (cit. a p. 48).

- Onorio, F. S. (2009a). *Isolamento sismico: le tappe storiche dal 1266 ad oggi*. URL: <http://www.strutturista.com/2009/05/isolamento-sismico-le-tappe-storiche-dal-1266-ad-oggi/> (cit. a p. 7).
- (2009b). *Tipologie di dispositivi e sistemi di isolamento*. URL: <http://strutturisti.wordpress.com> (cit. a p. 35).
- Saadeghvaziri, A.A. e M.Q. Feng (2001). «Experimental and Analytical Study of Base-Isolation for Electric Power Equipments». In: *MCERR Volume on Research Progress and Accomplishments*, pp. 29–40 (cit. a p. 49).
- Schwanen, W. (2004). «Modelling and identification of the dynamic behaviour of a wire rope spring». Master Thesis. Technische Universiteit Eindhoven (cit. a p. 61).
- Soong, T.T. e B.F. Spencer Jr (2002). «Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice». In: *Engineering Structures* 24, pp. 243–259 (cit. a p. 22).
- Soong, T.T. e G.C. Yao (1999). «Damage to Critical Facilities». In: *Preliminary Report from MCEER-NCREE Workshop, New York* (cit. a p. 46).
- Tsai, Chong-Shien (2012a). «Advanced Base Isolation Systems for Light Weight Equipments». In: *Earthquake Resistant Structures - Design, Assessment and Rehabilitation*. A cura di Prof. Abbas Moustafa. InTech, pp. 79–130 (cit. alle pp. 15, 17, 20, 55).
- (2012b). «Recent Advances In Seismic Isolation Systems». In: *The Fifth Kwang-Hua Forum on Innovations and Implementations in Earthquake Engineering Research*. Shanghai, China (cit. alle pp. 16, 36).
- Uang, C.M. e V.V. Bertero (1990). «Evaluation of seismic energy in structures, Earthquake engineering and structural dynamics». In: *Vol. 19, 77-90* (cit. a p. 26).
- Ueda, Satoshi, Takao Enomoto e Takafumi Fujita (2004). «Experiments and analysis of roller type isolation device». In: *booktitle*. 13th World Conference on Earthquake Engineering. 3362. Vancouver, B.C., Canada (cit. a p. 52).
- Walters, Mason (2003). «The Seismic Retrofit of the Oakland City Hall Seminar on Utilization of Strong-Motion Data». In: *Shanghai, China*, pp. 149–164 (cit. a p. 12).



Zayas, Victor, Stanley Low e Stephen Mahin (1990). «A simple pendulum technique for achieving seismic isolation». In: *Earthquake spectra* 6.2, pp. 317–333 (cit. a p. 15).